



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUT OF PROCESS AND ENVIROMENTAL ENGINEERING

TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ KALŮ Z ČOV

Sewage sludge incineration

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TEREZA ŠVEHLOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV BÉBAR, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tereza Švehlová

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Termické zpracování kalů z ČOV

v anglickém jazyce:

Sewage sludge incineration

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spalování kalů je jednou z možností energetického využití kalorického obsahu v organického podílu čistírenských kalů. Z pohledu spalování kalů je nejvýraznějším parametrem obsah sušiny, který ovlivňuje celkový kalorický obsah kalu. V práci budou posouzeny alternativy chemické a mechanické předúpravy čistírenských kalů s cílem dosáhnout zisku energie při spalování těchto materiálů.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je určit podmínky, za kterých může být spalování kalu procesem energeticky soběstačným, případně procesem energií produkujícím.

Posoudit alternativy termického zpracování kalů zahrnující různé úrovně vysušení kalu před vlastním spalováním a alternativy předchozí předúpravy (anaerobní stabilizací nebo aerobní stabilizace)

Seznam odborné literatury:

Lucie Houdková, Ladislav Bébar, Josef Kutil, Michal Touš

Efektivní energetické využití kalů z ÚČOV Praha

Zborník konferencie Ochrana ovzdušia 2008, p. 35-39, Proceedings AIR PROTECTION, KONGRES management s.r.o., 26.-28. november 2008, Vysoké Tatry – Šrbské Pleso, Slovenská republika, ISBN 978-80- 89275 –14-4

Pavel Šťasta, Jaroslav Boráň, Ladislav Bébar, Petr Stehlík, Jaroslav Oral, Thermal processing of sewage sludge Applied Thermal Engineering 26 (2006) 1420–1426

L. Houdková, J. Boráň, V. Ucekaj, P. Stehlík: Impact of sewage sludge dewatering on economic and environmental balance of high capacity waste water treatment plant, In 17th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2006, 7th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2006, August 27-31, 2006, Praha

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 11.11.2013 15:53

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou vzniku kalů z čističek odpadních vod a jejich následným termickým zpracováním. Cílem bylo porovnat možnosti energetického využití mechanicky odvodněného kalu a kalu s předchozí anaerobní předúpravou pro různé stupně vysušení kalu.

Abstract

The master's thesis deals with the problem of sewage sludge from wastewater treatment plants and their subsequent incineration. Main aim is compare some possibilities of the energy use of mechanically dewatered sewage sludge and sewage sludge with previous anaerobic pre-treatment for various levels of drying sludge.

Klíčová slova

Čistírenské kaly, termické zpracování, využití energie, sušení, směsný surový kal, anaerobně stabilizovaný kal.

Key words

Sewage sludges, incineration, energy to use, drying, mixed a crude sludge, anaerobically stabilized sludge.

Bibliografická citace

ŠVEHLOVÁ, T. *Termické zpracování kalů z ČOV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 50 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na zadané téma jsem vypracovala samostatně s použitím veškerých uvedených literárních pramenů a jiných zdrojů pod vedením vedoucího práce doc. Ing. Ladislava Bébara, CSc,

V Brně dne 30. 5. 2014

.....
Bc. Tereza Švehlová

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc. za cenné odborné konzultace. Také bych chtěla poděkovat své rodině za podporu.

Obsah

Seznam symbolů	10
Seznam zkratk a chemických vzorců	11
1 Úvod	12
2 Problematika kalů	13
2.1 Čistírny odpadních vod	14
2.2 Fyzikální a chemické vlastnosti kalů	15
3 Legislativa	17
4 Zpracování a úprava kalů.....	19
4.1 Primární nedestruktivní úprava čistírenských kalů.....	21
4.1.1 Anaerobní fermentace.....	21
4.1.2 Kompostování.....	24
4.1.3 Odvodňování	24
4.2 Termické zpracování kalů.....	24
4.2.1 Soustava termického zpracování surového kalu.....	25
4.2.2 Soustava termického zpracování anaerobně stabilizovaného kalu.....	25
5 Analýza alternativ procesu termického zpracování kalů	28
5.1 Výchozí podmínky a data	29
5.2 Použitý výpočtový nástroj - Waste to energy (W2E)	32
6 Postup výpočtů.....	33
6.1 Strategie výpočtů	33
6.2 Zadávaná data a sledované parametry	33
6.2.1 Výpočet tepla pro odpaření vody a k ohřátí kalu - SSK.....	34
6.2.2 Výpočet tepla pro odpaření vody a k ohřátí kalu – ASK	37
6.2.3 Výpočty výhřevnosti vlhkého kalu pro různé varianty sušení	38
6.2.4 Výpočty množství přídavného paliva	38
6.3 Hodnoty vložené v programu W2E	39
7 Výsledky výpočtů a jejich diskuse.....	41
8 Závěr	47
9 Seznam použité literatury	48
10 Přílohy	50

Seznam symbolů

A	obsah nespalitelného podílu ve vzorku	[% hm.]
C	obsah uhlíku ve vzorku	[% hm.]
c_p	měrné teplo sušiny kalu	[kJ/kg.K]
H	obsah vodíku ve vzorku	[% hm.]
h_1	měrná entalpie ohřáté vody	[kJ/kg]
h_2	měrná entalpie neodpařené vody	[kJ/kg]
h_3	měrná entalpie expandované páry za turbínou	[kJ/kg]
h_4	měrná entalpie zkondenzované vody na 6 barů	[kJ/kg]
$h_{(H_2O)}$	měrná entalpie vody [kJ/kg].	[kJ/kg]
HHV	spalné teplo	[MJ/kg],
$LHV_{(wet)}$	výhřevnost mokrého kalu	[MJ/kg]
$LHV_{(ZP)}$	výhřevnost ZP	[MJ/kg]
N	obsah dusíku ve vzorku	[% hm.]
O	obsah kyslíku ve vzorku	[% hm.]
Q_1	teplo na ohřev sušiny kalu	[kJ/t]
Q_2	teplo na odpaření vody	[kJ/t]
Q_3	teplo na ohřátí neodpařené vody	[kJ/t]
Q_4	vzniklé množství tepla získané ochlazením a kondenzací páry za turbínou	[GJ/kg]
Q_m	množství páry do sušárny	[kg/h]
Q_{Vmin}	minimální objemový průtok ZP	[m ³ /h]
Q_{ZP}	objemový průtok ZP	[m ³ /h]
$r_{(H_2O)}$	výparné teplo	[MJ/kg]
S	obsah síry ve vzorku	[% hm.]
t_1	vstupní teplota	[°C]
t_2	výstupní teplota	[°C]
$w_{(H_2O)}$	množství zbytkové vody ve vysušeném kalu	[%]
$w_{(H_2O),2}$	množství odpařené vody v sušárně	[%],
W_p	množství vzniklé vody z vodíku v hořlavině.	[kg/kg]
$w_{(s)}$	množství sušiny ve vysušeném kalu	[%]
X_1	počáteční relativní koncentrace	[t/t]
X_2	výstupní relativní koncentrace	[t/t]
$X_{(s)}$	hmotnostní koncentrace sušiny ve vysušeném kalu	[t/t]

Seznam zkratek a chemických vzorců

As	chemická značka arzenu
ASK	anaerobně stabilizovaný kal
AOX	halogenované organické sloučeniny
BP	bioplyn
BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad
C	chemická značka uhlíku
CaO	oxid vápenatý
Ca(OH) ₂	hydroxid vápenatý
Cd	chemická značka kadmia
CH ₄	metan
CO ₂	oxid uhličitý
Cr	chemická značka chromu
Cu	chemická značka mědi
ČOV	čistička odpadních vod
ČSÚ	Český statistický ústav
dry SSK	suchý směsný surový kal
EE	elektrická energie
H ₂	vodík
H ₂ O	voda
H ₂ S	sulfan
Hg	chemická značka rtuti
HRSG	Heat recovery steam generator
KJ	kogenerační jednotka
N ₂	dusík
NH ₃	amoniak
Ni	chemická značka niklu
O ₂	kyslík
Pb	chemická značka olova
PCB	polychlorované bifenyly
S	chemická značka síry
SSK	směsný surový kal
ÚČOV	Ústřední čistička odpadních vod
W2E	Waste to Energy
Zn	chemická značka zinku
ZP	zemní plyn

1 Úvod

Život na Zemi ovlivňuje mnoho faktorů. Mezi tyto nepostradatelné faktory nutné pro život je bezpochyby voda. Spotřeba vody se s rostoucí populací a průmyslem zvyšuje. Abychom vodu mohli využívat opakovaně a vytěžit z ní co nejvíce, je nutné ji velmi kvalitně vyčistit. S čištěním vody je spojen vznik nežádoucích produktů, vznik biologicky rozložitelného odpadu – kalu. Vysoké množství tohoto vyprodukovaného kalu se stalo jedním z aktuálních problémů, se kterými se potýká i Česká republika. Úprava vody je nastavena tak, aby se odstranily nežádoucí složky a koncentrovaly se do objemově nevýznamného produktu. Kal je nevyhnutelným odpadem při čištění vod a s vyššími nároky na čistotu vody bude jeho množství narůstat. Cílem úpravy kalů je zabránit nepříznivým dopadům na životní prostředí a lidské zdraví. [1]

Nejčastější úpravou vyprodukovaných kalů je převážně vyhnívání a odvodňování. Takto upravený kal se používá k rekultivaci, k výrobě kompostů nebo se skládkuje. Od tohoto způsobu se ustupuje už z důvodu výskytu těžkých kovů v kalu. Jednou z jevících se vhodných variant, jak zpracovávat vyrobený kal, je jeho spalování. Spalování kalů, jehož hlavní výhodou je eliminace jeho množství, snižuje rizika spojená s obsahem nežádoucích minoritních složek obsažených v kalech. Tato technologie je považována za moderní východisko při řešení této problematiky. V řadě případů zpracování separovaného surového kalu zahrnuje proces anaerobní stabilizace, při kterém vzniká energeticky využitelný bioplyn.

Sušina kalu jistý kalorický potenciál má, ať už v podobě vzniklého bioplynu při anaerobní stabilizaci nebo při samotném spalování. Úkolem mé diplomové práce je posoudit energetickou soběstačnost a stanovit podmínky pro různé stupně vysušení kalů z ČOV a porovnat tento způsob s variantou, které předchází anaerobní stabilizace.

2 Problematika kalů

Biologicky rozložitelné odpady, mezi které kaly z ČOV bezesporu patří, jsou objemově a hmotnostně významnou skupinou odpadů, která v případě uložení na skládky ohrožuje složky životního prostředí skleníkovými plyny a škodlivými průsaky. Čistírny ročně vyprodukují zhruba 170 až 210 tis. tun surového kalu. Toto narůstající množství odpadu je potřeba řešit. Dříve se tyto odpady používaly na zemědělské půdě. V dnešní době se skládkování kalů či jejich používání v zemědělství snažíme snižovat a zavést alternativní vhodnější využití těchto odpadů.

Množství vzniklého kalu a způsoby jeho zneškodnění od roku 2005 – 2012:

Rok	Produkce kalů (t)	Rekultivace	Kompostování	Skládkování	Spalování	Ostatní
2005	171 888	34 467	88 820	12 027	20	36 554
2006	175 471	48 304	89 932	13 979	27	23 229
2007	172 303	55 349	80 393	8 536	47	27 978
2008	75 708	46 776	78 289	11 986	712	37 945
2009	168 164	42 442	80 727	5 931	2 179	36 885
2010	170 689	60 639	45 528	6 177	3 336	55 009
2011	163 818	61 750	45 985	9 527	3 538	43 018
2012	168 190	51 912	53 222	9 340	3 528	50 188

Tabulka 1 - Kal z ČOV (zdroj ČSÚ)

Kaly představují suspenzi pevných látek a agregovaných koloidních látek původně přítomných v odpadních vodách a vzniklých při různých způsobech jejich čištění. Koncentrace kalů se vyjadřuje jako obsah sušiny kalu (např.: sušiny pod odvodnění bývá kolem 33 % a vody 67 %). Složení a obsah sušiny kalu závisí především na charakteru znečištění odpadních vod a na čistírenských procesech, kterými je prováděna úprava odpadních vod (mechanické čištění, biologické čištění nebo jejich kombinace, fyzikálně-chemické čištění nebo dočištění a pod). [2]

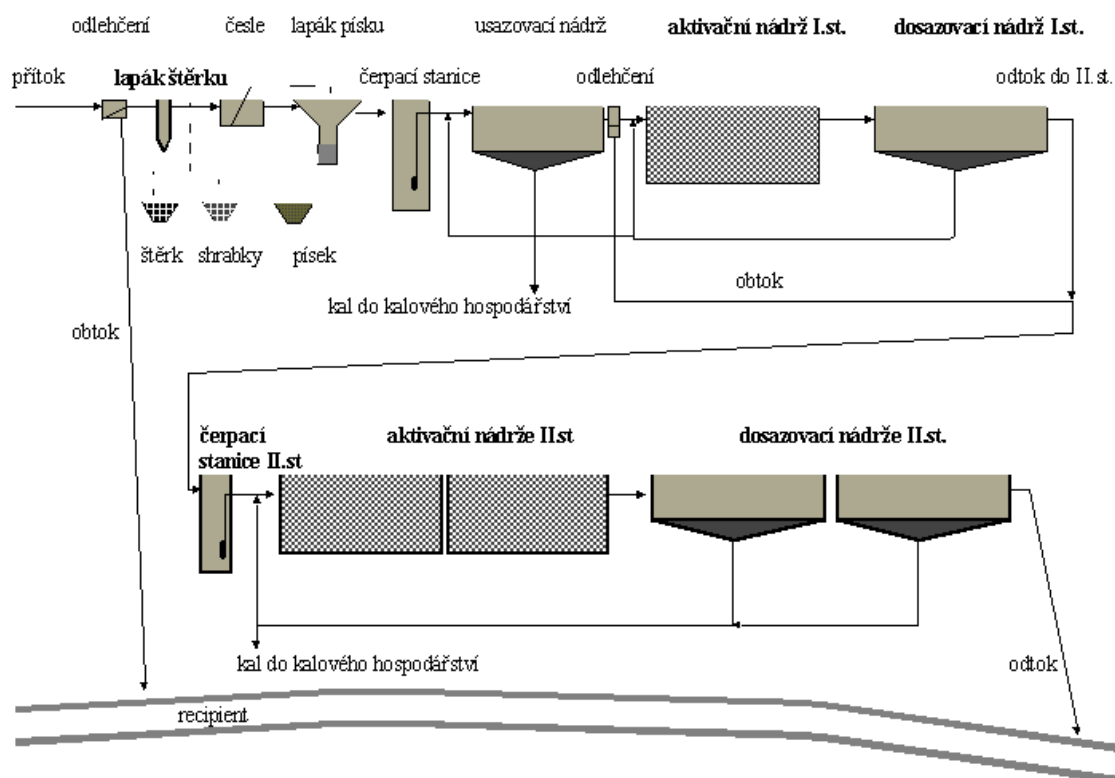
Rozdělení kalů podle charakteru a způsobu vzniku [2]:

- primární – usaditelný podíl nerozpuštěných látek v odpadní vodě
- biologický – přebytečný kal z aktivačního systému nebo kal z biologické filtrace – směs inertních nerozpuštěných látek a vyprodukované biomasy
- chemický – kal z chemického srážení fosforu
- upravený kal
- kal ze septiků a jim podobných zařízení – zda se jedná o odpad či odpadní vod je rozhodující způsob dalšího nakládání s tímto materiálem
- kapalný odpad – odpad, který sedimentací uvolňuje kapalnou fázi, za kapalný se nepovažuje kašovité, který po uložení tuhne v důsledku probíhajících chemických změn

- kompostovaný odpad
- biologicky rozložitelný odpad

2.1 Čistírny odpadních vod

Veškeré kaly vznikají v čističkách odpadních vod. Čističky odpadních vod slouží k čištění vody z průmyslových provozů, vod ze zemědělského průmyslu a k čištění splaškových vod z měst a obcí. ČOV rozdělujeme hlavně podle velikosti a typu čištění vod. Stupně čištění zpravidla dělíme na mechanické, biologické a fyzikálně - chemické. Většinou se jedná o kombinaci těchto procesů. Typy kombinace jsou ovlivňovány podle toho, o jaké vody se jedná. Pokud se jedná o vody z průmyslových provozů, čištění se přizpůsobuje charakteru provozu, z něhož tyto vody vznikají. Základní schéma čištění odpadních vod z komunálního sektoru je uvedeno na obrázku č. 1.



Obrázek 1 - Schéma čističky odpadních vod [3]

Typy čištění odpadních vod:

Mechanické čištění odpadních vod

Mechanické čištění odpadních vod patří mezi nejjednodušší způsoby čištění vody, které se nachází hned za vtokovým objektem. Mezi mechanické čištění patří procesy, jako jsou sedimentace, flotace či cezení. Mechanické čištění vod je důležité, protože zabraňuje poškození čerpadel a potrubní trasy v dalších stupních čištění. Toto čištění má obvykle dva stupně. První stupeň je odstranění hrubých zrn na česlích a v lapácích písku. Druhý stupeň,

stupeň sedimentace, obsahuje zejména usazovací nádrže. Množství organických látek se sníží cca o 30%. [4]

Biologické čištění odpadních vod

Tato fáze čištění odstraňuje znečišťující látky rozpuštěné ve vodě způsobem, který znemožňuje jejich sedimentaci. Technologické postupy takového čištění jsou například biologické filtry, kdy je biologická kultura přisedlá na povrchu, a aktivační nádrže, v nichž se jedná o technologii s biologickou kulturou ve vznosu. [4]

Fyzikálně-chemické odpadních vod

Po mechanickém a biologickém čištění se provádí čištění fyzikálně-chemické. Mezi tyto procesy řadíme koagulaci, srážení, neutralizaci, membránovou separaci a oxidační procesy. Odstraňují se poslední drobné částičky a upravuje se pH vody. [4]

2.2 Fyzikální a chemické vlastnosti kalů

Odpadním kalem se rozumí směs dvou nebo více odpadních látek. Skládá se ze souvislé kapalně fáze a nejméně jedné dispergované tuhé látky. Kaly tvoří 1 – 2 % objemu znečištěných vod, ale koncentrace původního znečištění je v nich obsažena až v 50 – 80 %. Způsobují to patogenní organismy, toxické látky, mezi které patří halogenované organické sloučeniny (AOX), polychlorované bifenylly (PCB) a hlavně těžké kovy (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn). Složení kalu je ovlivněno demografickými, klimatickými a geografickými faktory. Patogenní organismy jsou především viry a bakterie. Mimo toto negativní složení obsahují kaly i mnoho živin představované především sloučeninami obsahujícími dusík, fosfor a obvykle nízkým obsahem draslíku. Rozdíly ve složení kalu jsou mezi jednotlivými čističkami výrazné, ale u dané čističky poměrně stálé, pH je většinou neutrální. [5]

Typická elementární analýza organického podílu sušiny v kalu	Primární kal (hm. %)	Přebytečný kal (hm. %)	Směsný surový kal (hm. %)	Vyhnílý kal (hm. %)
C	60,0	53,0	57,0	67,0
H	7,5	7,0	7,0	5,0
O	28,0	30,5	30,0	25,0
N	3,0	9,0	5,0	2,2
S	1,5	0,5	1,0	0,8

Tabulka 2 - Složení organického složení kalu [6]

Kromě obsahu AOX, PCB a těžkých kovů je sledovanou vlastností kalu jeho konzistence a koncentrace tuhých složek v kapalině. Vazba vody k pevné fázi je proměnná a občas ke kalu pevně vázána a odstraňuje se s vynaložením velkého množství energie (odstředivky, tepelná energie). Touto problematikou se zabýval Thomas Elsaesser ve své disertační práci. Kaly z městských ČOV obsahují průměrně 0,5 až 7 % sušiny obsahující asi 60 – 70 % organických

látek. V tuhé fázi se nachází zhruba 80 % suspendovaných částic o velikosti větší než 0,1 mm a asi 20 % menších než 0,1 mm. Většina částic má koloidní či kapilární tvar, který zadržuje hodně vody a tím znesnadňuje jeho odvodňování (zanášení filtračních plachetek). [5]

3 Legislativa

Nakládání s kaly z čističek odpadních vod je řízeno mnoha zákony České republiky. Jedním z hlavních zákonů je zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. Podle vyhlášky č. 381/2001 Sb. (Katalog odpadů) spadají kaly pod katalogové číslo 19 08 05. Dalším z důležitých nařízení, které ovlivnilo především skládkování biologicky rozložitelného odpadu, kam kaly bezesporu patří, byl Plán odpadového hospodářství ČR. Závazná část Plánu odpadového hospodářství byla vyhlášena v nařízení vlády č. 197/2003 Sb. a jeho platnost byla určena na deset let, tedy na roky 2003 – 2013, kdy jedním z cílů bylo snížit maximální množství biologicky rozložitelných komunálních odpadů ukládaných na skládky tak, aby podíl této složky činil v roce 2010 nejvíce 75% hmotnostních, v roce 2013 nejvíce 50% hmotnostních a výhledově v roce 2020 nejvíce 35% hmotnostních z celkového množství BRKO vzniklého v roce 1995. [1]

Pokud se kaly používají v zemědělství, kdy se mísí s přírodními i syntetickými hnojivy, jsou limitní hodnoty obsahu těžkých kovů, AOX a PCB stanoveny vyhláškou jeho složení jsou limitovány. Jedná se o vyhlášku č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. [1]

Prvek	Maximální (mezní) hodnoty koncentrací v kalu (mg/kg sušiny)
As	30
Cd	5
Cr	200
Cu	500
Hg	4
Ni	100
Pb	200
Zn	2500

Tabulka 3 - Limitní hodnoty koncentrací některých prvků v kalech pro použití v zemědělství [7]

Podmínky spalování kalů a limitní hodnoty na vznikající emise a produkty spalování se řídí nařízeními vyhlášky č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.

Legislativa EU (zdroj MŽP):

- směrnice Rady 86/278/EHS, o ochraně životního prostředí a zvláště půd (využívání kalů na povrchu terénu),
- směrnice Rady 2000/60/ES, o vodě (kontrola znečišťujících látek),
- směrnice Rady 1999/31/ES, o skládkách odpadů (omezení ukládání čistírenských kalů na skládky).

Další zákony, které souvisí s kaly z ČOV (zdroj MŽP):

- zákon č. 274/2001 Sb., o provozování vodovodů a kanalizací pro veřejnou potřebu,
- zákon č. 254/2001 Sb., o ochraně vod (vodní zákon),
- zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví,
- vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady a jiné.

4 Zpracování a úprava kalů

Zpracovávat kaly lze několika způsoby. Od některých způsobů se již upouští a snaží se přejít na způsoby, které jsou více přijatelné pro životní prostředí a které jsou ekonomicky únosné. Asi 50 % nákladů na čištění odpadních vod připadá na zpracování kalů. Tyto náklady se velmi těžko snižují vzhledem k narůstajícím požadavkům ze strany Evropské unie a legislativy obecně. 21. května 1991 vyšla v platnost směrnice Rady 91/271/EEC, o čištění městských odpadních vod. Česká republika se zavázala, že roku 2010 na základě této směrnice musí všechny čistírny odpadních vod na území ČR splňovat zpřísněné limity pro „citlivé oblasti“. [2], [6]

Úprava kalů začíná už v čističkách odpadních vod. Technologická linka na zpracování kalu je uspořádaná s ohledem na metodu konečného řešení. Způsoby zpracování kalů musí splňovat několik podmínek [2]:

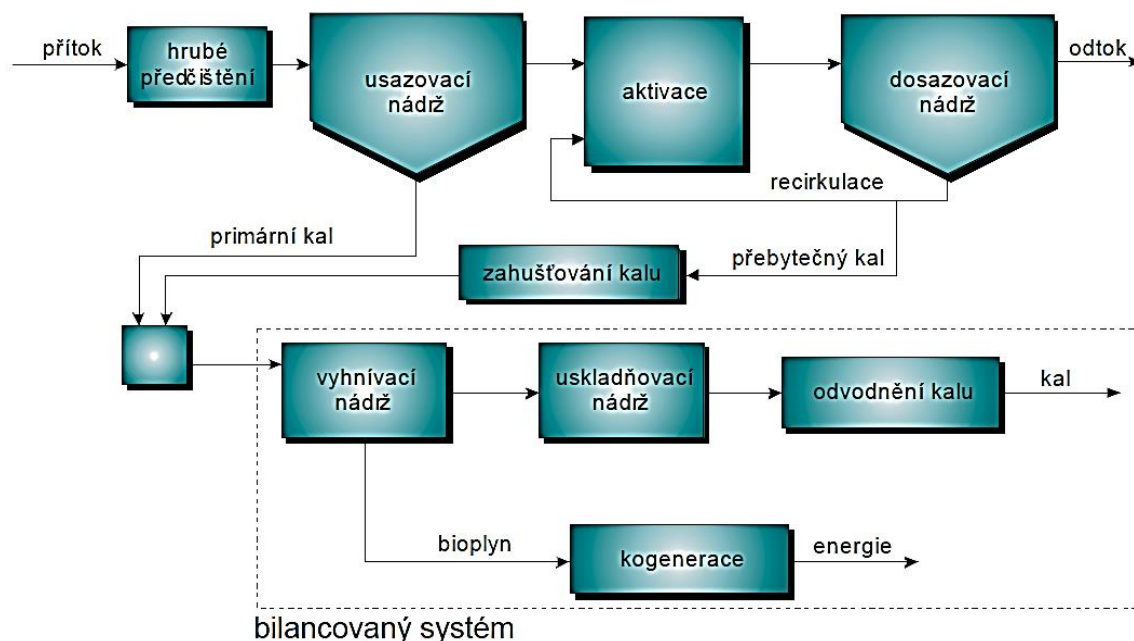
- musí splňovat domácí i mezinárodní legislativu v oblasti ochrany životního prostředí,
- musí být akceptovány veřejností,
- musí vést k maximálnímu využití energií a cenných látek z kalů za současné minimalizace nákladů a celkové potřeby energie,
- musí být po technické stránce spolehlivé a ekonomicky dostupné,
- musí být přijatelné z hlediska ochrany životního prostředí (emise, využití energie, potenciální riziko kalových reziduí pro lidské zdraví a pod.).



Obrázek 2 - Čistička odpadních vod v Krnově [8]

Před definitivním zneškodněním kalu předchází jeho úprava, která ovlivní množství kalů. Tuto úpravu můžeme rozdělit do čtyř oblastí (obrázek č. 3) [2] :

- mechanické (primární) čištění kalu,
- snižování produkce biomasy v aerobním biologickém stupni,
- způsoby předúpravy a stabilizace kalů,
- metody využití a likvidace kalů.



Obrázek 3 - Úprava kalů [9]

Mechanické (primární) čištění kalu

Většina znečištění přicházející na čistírnu je ve formě suspendovaných látek v surové odpadní vodě, což udává celkové množství primárního kalu. Přidáním koagulačních činidel se snižuje obsah suspendovaných látek, zvyšuje se množství primárního kalu a snižuje se zatížení aktivačního procesu. [2]

Snižování produkce biomasy v aerobním biologickém stupni

Pokud upravíme technologické parametry kalu, kterými jsou stáří kalu a limitace substrátem, omezíme produkci přebytečného aktivovaného kalu. [2]

Způsoby předúpravy a stabilizace

Metoda předúpravy a stabilizace kalů spadá pod intenzifikaci procesů v oblasti zpracování kalu. Jedná se o procesy desintegrace, termofilní stabilizaci, termofilní aerobní stabilizaci, aj. [2]

Metody využití a likvidace kalů

Pro finální nakládání s odvodněnými čistírenskými kaly připadá v úvahu kompostování, použití pro rekultivaci nebo spalování. Mimo již zmíněné kompostování či využití k rekultivaci, spadá pod tyto metody spoluspalování, spalování v cementárenské peci, pyrolýza nebo zplyňování. Pro všechny tyto konečné výstupy je nutné snižování množství vody v kalu. [2]

4.1 Primární nedestruktivní úprava čistírenských kalů

Primární nedestruktivní úpravy čistírenských kalů jsou takové, které předcházejí například tepelnému zpracování. Mezi primární úpravy patří:

- anaerobní fermentace,
- kompostování a aplikace kalů v zemědělství,
- odvodňování.

4.1.1 Anaerobní fermentace

Energeticky vhodným způsobem zpracování bioodpadů je anaerobní fermentace neboli zpracování bioodpadů bez přístupu vzduchu. Od kompostování se liší tím, že se provádí v uzavřených nádobách tzv. fermentorech a mohou se takto zpracovávat i druhy bioodpadu, které jsou pro kompostování nevhodné (ty s vysokým obsahem vody, zbytky z průmyslových a potravinářských provozů, kuchyňské zbytky, odpady živočišného původu). Kyslík je pro anaerobní bakterie (bakterie přeměňující bioodpad na bioplyn) jedovatý – nesmí se s ním dostat do styku. Touto metodou vzniká mimo kvalitního přírodního hnojiva bez zápachu také bioplyn, ze kterého vyrábíme elektrickou energii a teplo. Doba zdržení kalu ve fermentorech se pohybuje průměrně okolo 21 dní. Objem fermentorů na produkci 1 tuny suchého SSK/den je zhruba 350 až 450 m³ (při obsahu kalu cca 6% je 1 t SSK v 16,7 m³, při době zdržení 21 dnů = 350 m³). [10]



Obrázek 4- Fermentor [11]

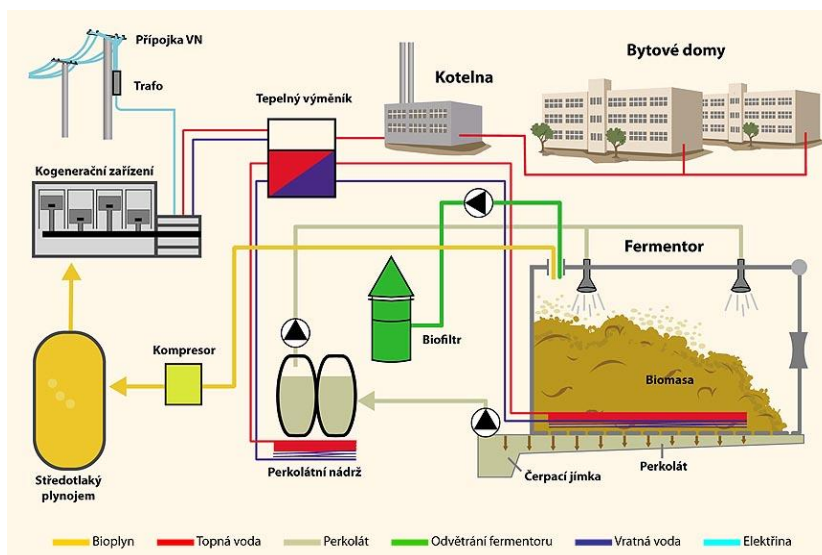
Z mezofilní fermentace (30 – 40 °C) se přechází na termofilní (55°C) zvýšením teploty pro lépe fungující stávající zařízení. Díky vyšší teplotě při termofilní fermentaci se zvyšuje rychlost rozkladu organických látek v kalu a účinnost procesu tím, že se prohloubí jejich rozklad. Velikou výhodou této fermentace je snížení objemu reaktorů a umožňuje pracovat s jejich vyšším zatížením při vyšší výrobě bioplynu a snížení množství stabilizovaného kalu. [2]

Kombinovaným působením lyzace přebytečného aktivovaného kalu a termofilní anaerobní stabilizace surového směsného kalu za současné optimalizace míchání, dávkování a zahušťování se dosáhne prohloubení anaerobního rozkladu a podstatného zrychlení procesu stabilizace. To má za následek [2]:

- zvýšení produkce bioplynu o 30 - 40%,
- snížení množství stabilizovaného kalu a snížení obsahu organických látek v stabilizovaném kalu pod 50%,
- celkové zkapacitnění celého kalového hospodářství,
- zvýšení stability provozu, protože vyhřívací nádrže provozované termofilně nepění;
- zvýšení hygienického zabezpečení výstupního stabilizovaného kalu,
- vysoce efektivním využitím bioplynu v kogeneračních jednotkách se získá ekologická obnovitelná energie, čímž se ČOV může přiblížit k soběstačnosti ve spotřebě elektrické a tepelné energie.

Suchá fermentace

Biomasa je navedena do fermentoru kolovým nakladačem. Po naplnění fermentoru jsou uzavřena plynotěsná vrata. Biomasa je vyhřívána podlahovým topením a postřikem perkolátu, který současně obnovuje mikrobiální kulturu na povrchu biomasy. Do tří dnů po navedení dojde k odstranění zbytkového kyslíku. Vznikající bioplyn je odsáván do plynových vaků a dále odváděn do kogenerační jednotky. Zde je transformován na elektrickou energii při vzniku „odpadního“ tepla. Obvyklá délka cyklu je 28 dnů. Pro kontinuitu procesu se doporučuje pracovat minimálně se čtyřmi fermentory. Na konci cyklu je biomasy vyvezena a část vyfermentovaného substrátu je nahrazena novou biomasou v tzv. „směsném navýšení“ (poměr mezi starou, částečně vyfermentovanou biomasou a čerstvou biomasou). Proces je až na manipulaci s biomasou plně automatizován. [12]



Obrázek 5 - Suchá fermentace čistírenských kalů [12]

Bioplyn

Jedná se vysoce hořlavý plyn, který je lehčí než vzduch. Je produktem anaerobní fermentace organických materiálů. Substrát pro výrobu bioplynu je organická hmota rostlinného nebo živočišného původu a při jeho efektivním a ekologickém zpracování nedochází k významným negativním vlivům na životní prostředí. Hlavním cílem výroby bioplynu je likvidace organického znečištění a stabilizace organické hmoty. [13]

Bioplyn se skládá převážně z majoritních složek - CH₄ a CO₂ a menšího množství zastoupených složek (do 1 %) - H₂, H₂S, N₂. Je velmi cennou surovinou právě díky vysokému obsahu metanu. Po výstupu z reaktoru obsahuje malé množství H₂O podle teploty procesu (3 – 4 %) a také stopová množství amoniaku, mastných kyselin aj. [13]

Složka	Typická koncentrace (% obj.)
metan (CH ₄)	58 – 80
oxid uhličitý (CO ₂)	20 – 42
vodní pára (H ₂ O)	0 – 10
sulfan (H ₂ S)	0 – 1
dusík (N ₂)	0 – 5
kyslík (O ₂)	0 – 2
amoniak (NH ₃)	0 – 1

Tabulka 4 - Příklad složení bioplynu [13]

Bioplyn se poté spaluje v kogeneračních jednotkách vyrábějících elektrickou energii s účinností asi 30 až 36 % a produkujících tepelnou energii s účinností cca 50 % (vztaženo na teplo uvolněné spalováním bioplynu). Výrobou bioplynu anaerobní fermentací se sníží

organický podíl v kalu na $0,6 \text{ mN}^3/\text{kg}$. Detailní výpočet bilance anaerobní stabilizace uveden v kapitole 4.2.2.

4.1.2 Kompostování

Kompostování je oxidační (aerobní) proces, kdy se rozkládají organické části za vzniku humusových látek. Tyto látky můžeme následně vrátit do přírody. Čerstvý kompost se získá za 2 - 6 měsíců, vyzrálý kompost za 6 - 12 měsíců. [14]

4.1.3 Odvodňování

Odvodňováním zahuštěných kalů se pomocí odstředivek dosáhne zvýšení obsahu sušiny v produkovaném materiálu z původní koncentrace cca 4 - 6 % hm. na obsah cca 30% hm. sušiny. Při odvodňování kalu dochází ke zmenšení jeho objemu a tím ke zmenšení nároků na transport a zpracovatelské technologie pro využití kalu. Tento proces je také základní podmínkou pro jeho spalování. Zmenšením objemu kalu odstraněním přebytečné kalové vody dochází také ke snížení dávek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nebo CaO při hygienizaci kalu. To vše vede k úsporám nákladů na zpracování, využití a likvidaci kalů. [15]

Zkoušky odvodňování prováděl ÚPEI v roce 2005 v Praze, kdy byl hodnocen vliv přídavku různých koagulátorů k zpracovávanému surovému, resp., anaerobně stabilizovanému kalu. Byl zjištěn dosažitelný stupeň odvodnění kalu na obsah sušiny cca 28 až maximálně 35%. Pro dále provedené rozpravy podmínek termického zpracování kalů bylo předpokládáno dosažení odvodnění kalu na obsah 33 % sušiny.

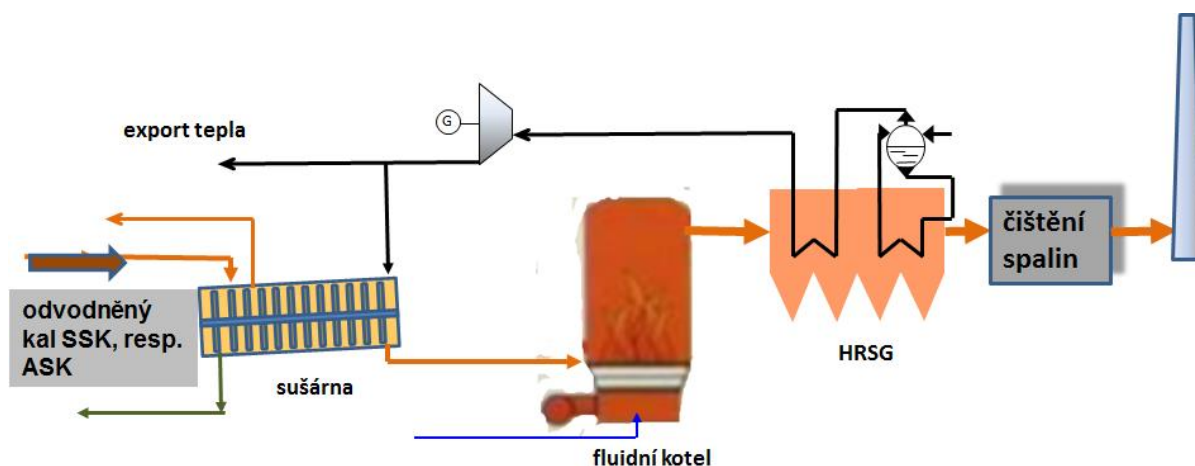
4.2 Termické zpracování kalů

Spalování biomasy jako takové se začalo řešit z hlediska energetického využití obnovitelných zdrojů. Oproti spalování fosilních paliv má spalování biomasy téměř nulovou bilanci CO_2 . Produkce oxidu uhličitého je neutrální, jelikož jeho množství uvolňované do ovzduší spalováním je přibližně stejné jako to, co se zpětně váže do rostlin. Nízká je také hodnota uvolněného obsahu oxidu síry (0 až 0,1 % síry má dřevo či sláma oproti uhlí, které obsahuje někdy až 2 %). [16]

Kaly z čističek odpadních vod se pod biomasu řadí, avšak jejich spalování je velmi specifické hlavně z důvodu vysokého obsahu vody v nich. Energetická bilance spalování procesu spalování je závislá na složení kalu a na použité technologii spalování. Pro dokonalé spalování je v kalu důležité zastoupení složek s vyšší výhřevností a kal může být spalován samostatně. Pokud však kal obsahuje vyšší množství nespalitelných složek, palivo může být nespalitelné a je nutné přidat přídatné palivo s lepší výhřevností. Stejně jako u biomasy

obecně, tak u kalů je důležité, aby spalování probíhalo za vysoké teploty, účinném směřování se vzduchem a dostatečným prostorem k tomu, aby všechny plyny shořely v kotli a nehořely až v komíně. [16]

Pro spalování biomasy se využívají fluidní kotle, které pracují na principu spalování v tzv. fluidní vrstvě, kdy je palivo udržováno ve vznosu proudem vzduchu. Fluidní vrstva tvoří disperzní systém, který se vytváří průtokem plynu vrstvou částic nasypných na pórovité dno – fluidní rošt. Náplň fluidní vrstvy je tvořena palivem, odsiřovací látkou (především vápencem) a inertním materiálem (např. pískem). Tento typ kotlů je vhodný pro spalování paliv s nižší výhřevností, které jsou v jiných kotlích nespalitelné. [17]



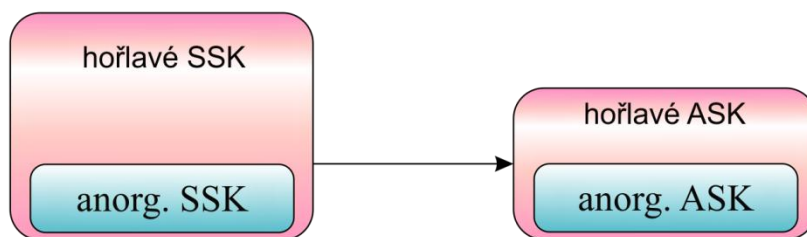
Obrázek 6 - Schéma spalování biomasy

4.2.1 Soustava termického zpracování surového kalu

Surový kal na rozdíl od anaerobně stabilizovaného kalu stále obsahuje vysoké množství hořlavých látek, proto je jeho spalování možné téměř bez přídavku kvalitního přídavného paliva. Výpočty jsou pro zjednodušení počítány pro 1 tunu sušiny.

4.2.2 Soustava termického zpracování anaerobně stabilizovaného kalu

Anaerobně stabilizovaný kal obsahuje nízké množství hořlaviny. Jeho spalování vyžaduje dodávání přídavného paliva ve většině případech vysušení (viz. tabulka č. 20). Množství popeloviny po anaerobní stabilizaci je oproti surovému kalu neměnné (viz. obrázek č. 7). Pro porovnání variant vychází výpočty ze stejného množství sušiny (1 t). Po anaerobní stabilizaci se množství sušiny změní dle anaerobní bilance.



Obrázek 7- Schéma anorganického a organického podílu sušiny u SSK a ASK

Typické bilanční údaje pro proces anaerobní stabilizace surového kalu

Při anaerobní stabilizaci dochází v důsledku produkce kaloricky hodnotného bioplynu k poklesu výhřevnosti z hodnoty 15,807 MJ/kg na výhřevnost 10,821 MJ/kg. To se odrazí v menším množství uvolněného tepla při spalování anaerobně stabilizovaného kalu. Ve výsledku budou hodnoty vzniklého tepla za parní turbínou pro varianty ASK nižší než u varianty SSK.

Charakteristika	Jednotka	Hodnota
Organický podíl v SSK	kg/t _{dry} SSK	675,7
Převedený anorganický podíl sušiny z SSK	kg/t _{dry,SSK}	324,6
Stupeň konverze org. látek při anaerobní stabilizaci	%	57
Zkonvertované množství org. podílu	kg/t _{dry} SSK	385,1
Měrná produkce bioplynu z org. podílu	mN ³ /kg	0,6
Vytvořené množství bioplynu	mN ³ /t _{drySSK}	405,2
Obsah CH ₄ v bioplynu	obj. %	63
Obsah CO ₂ a N ₂ v bioplynu	obj. %	37
Střední molární hmotnost bioplynu	kg/kmol	26,4
Výhřevnost bioplynu	MJ/mN ³	22,5
Kalorický obsah bioplynu	GJ/t _{drySSK}	9,1
Anorganický podíl v sušině SSK	kg/t _{dry} SSK	324,6
Zbytkové množství org. podílu v ASK	kg/t _{dry} SSK	290,6
Celkové množství sušiny ASK	kg/t _{dry} SSK	614,9
Anorganický podíl v sušině ASK	% hm.	52,78
Podíl hořlaviny v sušině ASK	% hm.	47,21

Tabulka 5 - Bilance anaerobní stabilizace

Výroba energie v kogenerační jednotce

Aby bylo množství tepla z varianty ASK porovnatelné s množstvím tepla z SSK, musí se teplo vzniklé v kogenerační jednotce přičíst k teple vzniklému za parní turbínou. V kogenerační jednotce vzniká i energie elektrická.

Charakteristika	Jednotka	Hodnota
Vytvořené množství bioplynu	$\text{mN}^3/\text{tdrySSK}$	405,24
Kalorický obsah v bioplynu	$\text{GJ}/\text{tdrySSK}$	9,14
Účinnost výroby elektrické energie v KJ	% z $Q_{\text{uvoln.}}$	34,0
Účinnost výroby tepelné energie v KJ	% z $Q_{\text{uvoln.}}$	49,8
z toho		
vysokopotenciální	% z $Q_{\text{uvoln.}}$	23,0
nizkopotenciální		26,8
Výroba elektrické energie	$\text{kWh}/\text{tSSK,dry}$	863,2
Výroba tepelné energie	$\text{GJ}/\text{tdrySSK}$	4,55
z toho z toho		
vysokopotenciální	$\text{GJ}/\text{tdrySSK}$	2,10
nizkopotenciální		2,45

Tabulka 6 – Účinnost výroby tepelné a elektrické energie v kogenerační jednotce [18]

Všechny hodnoty jsou počítány pro výhřevnost bioplynu $22,554 \text{ MJ}/\text{mN}^3$ a pro kogenerační motor MGW 700 s nominálním výkonem 75 %.

Pro zde uvedené výpočty byl přijat zjednodušený předpoklad, že veškerý vyrobený bioplyn je veden do kogenerační stanice, kde je získaná el. energie s účinností 34 % a tepelná energie s účinností 49,8 % uvolněného tepla. Nizkopotenciální tepelná energie (26,8 % z uvolněného tepla) vzniklá z bioplynu v kogenerační jednotce se využije na tepelnou energii potřebnou pro anaerobní stabilizaci. Tudíž z celkových 49,8 % uvolněného tepla zůstane pouze 23 % ($2,10 \text{ GJ}/\text{tdrySSK}$) přebytečné tepelné energie. Při porovnávání varianty surového směsného kalu a anaerobně stabilizovaného kalu bylo množství tepla využité k anaerobní stabilizaci zanedbáno a k teplu vzniklému za parní turbínou bylo přičteno celých $4,55 \text{ GJ}/\text{tdrySSK}$.

Charakteristika	Jednotka	Hodnota
Účinnost EE v KJ	% z $Q_{\text{uvoln.}}$	34,0
Tepelná účinnost	% z $Q_{\text{uvoln.}}$	49,8
Výroba EE v KJ	$\text{kWh}/\text{tSSK,dry}$	863,20
Výroba tepla v KJ	$\text{GJ}/\text{tdrySSK}$	4,55

Tabulka 7 – Výroba energie z bioplynu v kogenerační jednotce

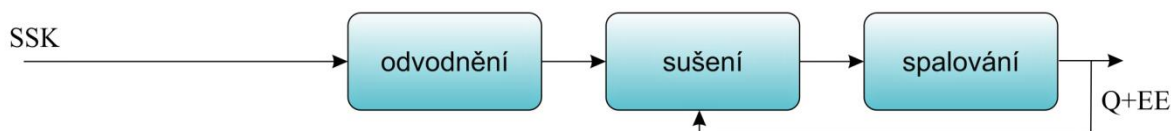
5 Analýza alternativ procesu termického zpracování kalů

Cílem diplomové práce je vyhodnotit, pro které stupně vysušení kalu je energie vzniklá ze spalování dostatečná pro vysušení kalu na dané procento sušiny a kdy je proces produkující přebytečnou energii. Následně je srovnáno několik stupňů vysušení směsného surového kalu se stejnými stupni vysušení kalu po anaerobní stabilizaci, která výrazně ovlivňuje množství organického podílu kalu (a tím výhřevnost kalu), který je pro spalování podstatný. V druhém případě (ASK) je přičteno množství tepla vzniklé z kogenerační jednotky, která mimo tepelné energie vyrábí i energii elektrickou.

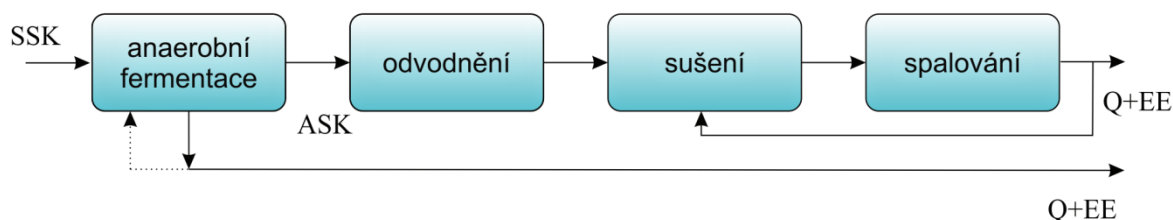
Pro každou soustavu bylo voleno šest stupňů vysušení – od 90 % sušiny po 40 % sušiny. Výpočty jsou provedeny pro zpracování 1 tuny sušiny směsného surového kalu.

V případě analýzy variant termického zpracování ASK jsou výsledky výpočtů uvedeny pro 0,615 t sušiny anaerobně stabilizovaného kalu. Toto je provedeno z důvodu možnosti porovnání výsledků výpočtů energetické náročnosti, resp. energetického zisku alternativ zpracování kalu SSK a ASK. Zvolená hodnota vychází z bilanční rozvahy, kterou se dospělo k závěru, že z 1 tuny SSK vzniká rozkladem organického podílu bioplyn a zbytkové množství sušiny anaerobně stabilizovaného kalu činí cca 0,615 t.

Výsledkem je porovnání variant a stupňů vysušení SSK a ASK a stanovit, kdy je množství vyrobeného tepla za turbínou dostačující na vysušení na potřebný stupeň sušiny. Pro výpočty byl použit program W2E, který je komentován v kapitole 5.2.



Obrázek 8 – Schéma varianty SSK



Obrázek 9 - Schéma varianty ASK

5.1 Výchozí podmínky a data

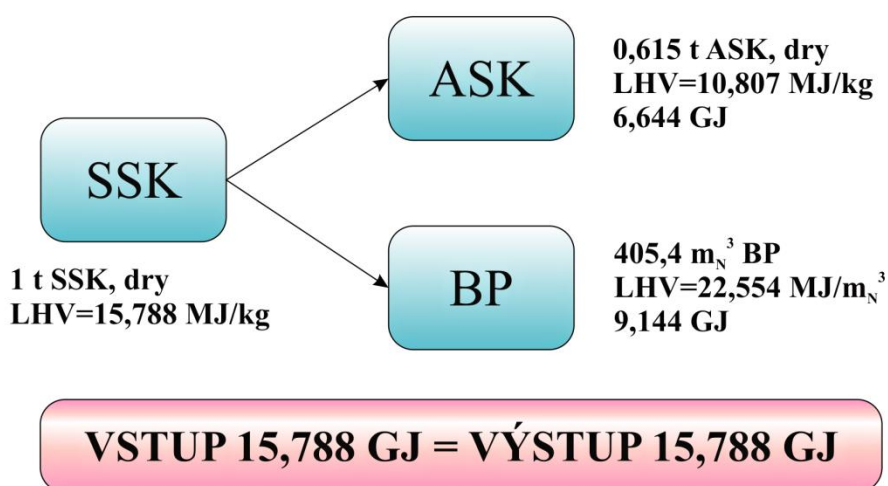
Složení směsného surového a anaerobně stabilizovaného kalu

Výpočty vycházely z měření, která byla provedena Ústavem procesního a ekologického inženýrství VUT v Brně v ÚČOV Praha [19], kdy jednorázovým měřením bylo zjištěno složení SSK a ASK, které je uvedeno v tabulce č. 8.

Veličina	Jednotka	SSK	ASK
Obsah C v sušině	% hm.	60,27	62,7
Obsah H v sušině	% hm.	6,51	8,27
Obsah N v sušině	% hm.	8,35	7,38
Obsah O v sušině	% hm.	24,79	21,6
Obsah S v sušině	% hm.	2,22	2,22
Obsah Cl v sušině	% hm.	0,01	0
Hořlavina	% hm.	67,57	49,21
Nespalitelný podíl	% hm.	32,43	50,79

Tabulka 8 - Původní naměřené hodnoty složení kalu [19]

Původní údaje o složení anaerobně stabilizovaného kalu byly vyrovnány tak, aby byla splněna materiálová a tepelná bilance procesu anaerobní stabilizace. Jednalo se o úpravu obsahu síry a velikost anorganického podílu v ASK tak, aby byla splněna podmínka, že do ASK přechází veškerý anorganický podíl původně obsažený v SSK a aby energetický obsah 1 tuny SSK odpovídal součtu energetického obsahu vzniklého anaerobně stabilizovaného kalu a bioplynu. Byl přijat předpoklad, že teplo potřebné k temperování stabilizačních nádrží bude kryto produkcí tepla v kogenerační jednotce.



Obrázek 10 – Výsledky energetická bilance procesu anaerobní stabilizace a tvorby ASK

Podle této energetické bilance byla upraveno složení ASK (viz. tabulka č. 18). Také bylo upraveno množství síry, jelikož průměrná hodnota z pouhých dvou měření byla vysoká a pro další výpočty bylo nutné mít součet všech složek 100 %.

Veličina	Jednotka	SSK	ASK
Obsah C v sušině	% hm.	60,27	62,7
Obsah H v sušině	% hm.	6,51	8,27
Obsah N v sušině	% hm.	8,35	7,38
Obsah O v sušině	% hm.	24,79	21,6
Obsah S v sušině	% hm.	0,07	0,05
Obsah Cl v sušině	% hm.	0,01	0
Hořlavina	% hm.	67,57	56
Nespalitelný podíl	% hm.	32,43	44

Tabulka 9 – Upravené hodnoty SSK a ASK [19]

Kalorická data

Jelikož vlastní výpočet spalování kalů je výrazně ovlivněn hodnotou výhřevnosti spalovaného materiálu, byl výpočet spalného tepla (HHV) a výhřevnosti (LHV) proveden několika alternativními způsoby.

Spalné teplo (HHV) je takové množství tepla, které se vyvine dokonalým spálením jednotkového množství (kg, kmol, mN³) paliva, jestliže se spaliny ochladí na původní teplotu paliva a voda po spálení bude získána v kapalném stavu (zkondenzuje). [20]

Výhřevnost (LHV) je takové množství tepla, které se vyvine dokonalým spálením jednotkového množství (kg, kmol, mN³) paliva, jestliže se spaliny ochladí na původní teplotu paliva a voda po spálení zůstane v plynném stav. Z důvodu, že spaliny nekondenzují a zůstanou v plynném stavu, je výhřevnost oproti spalnému teplu nižší o teplo uvolněné kondenzací vodní páry vzniklé spálením hořlaviny paliva a vody v palivu přítomné [20].

Výsledky výpočtu spalného tepla hořlaviny kalů SSK a ASK variantními postupy dle [21] jsou uvedeny v tabulce č. 10.

Výpočty podle autora:	Vypočtená hodnota spalného tepla [kJ/kg]			
	SSK [kJ/kg]		ASK [kJ/kg]	
	hořlavina	suchý vzorek	hořlavina	suchý vzorek
Dulong	24 583	16 611	28 028	12 332
Steuer	26 670	18 021	30 443	13 395
Michel	26 698	18 040	29 966	13 185
Gumz	25 226	17 045	28 096	12 362

Mendělejev	24 440	16 514	27 424	12 067
Boie	24 736	16 714	27 579	12 135
Channiwala	24 882	16 772	26 408	11 619

Tabulka 10 - Variantní hodnoty výpočtů HHV

Příklad výpočtu spalného tepla a výhřevnosti kalu podle Channiwala (vztah 5-1) [22]:

Charakteristika	Jednotka	SSK	ASK
Obsah H v hořlavíně	% hm.	6,51	8,27
Obsah Cl v hořlavíně	% hm.	0,014	0
Obsah H v celkovém palivu	kg/kg	0,043	0,036
Obsah Cl v celkovém palivu	kg/kg	0	0
Spotřeba H na vytvoření HCl	kg/kg	2,68.E-06	0
Na vytvoření H ₂ O z H	kg/kg	0,044	0,036
Vytvořená voda (W _p)	kg/kg	0,393	0,325

Tabulka 11 - Vstupní hodnoty pro výpočet HHV a LHV

Výpočet spalného tepla:

$$HHV = 0,34519 \cdot C + 1,1783 \cdot H - 0,1034 \cdot O + 0,1005 \cdot N - 0,0211 \cdot A \quad (5-1)$$

, kde:

- HHV spalné teplo [MJ/kg],
- C obsah uhlíku ve vzorku [% hm.],
- H obsah vodíku ve vzorku [% hm.],
- O obsah síry ve vzorku [% hm.],
- S obsah síry ve vzorku [% hm.],
- N obsah dusíku ve vzorku [% hm.],
- A obsah popeloviny ve vzorku [% hm.].

Výpočet výhřevnosti:

$$LHV = HHV - r_{(H_2O)} \cdot W_p \quad (5-2)$$

, kde:

- HHV spalné teplo [MJ/kg],
- $r_{(H_2O)}$ výparné teplo [MJ/kg],
- W_p množství vzniklé vody z vodíku v hořlavíně [kg/kg].

Charakteristika	Jednotka	SSK	ASK
Spalné teplo	MJ/kg	16,772	11,619
Výhřevnost	MJ/kg	15,807	10,821

Tabulka 12 - Použité hodnoty spalného tepla SSK a ASK pro výpočty spalování

5.2 Použitý výpočtový nástroj - Waste to energy (W2E)

Spalování odpadů v současných zařízeních v sobě spojuje řadu energetických, chemických a termodynamických dějů. Pro simulaci tohoto procesu jsou sice využitelné komerčně dostupné výpočtové nástroje (CHEMCAD, ASPEN PLUS, ASPEN HYSYS, Pro/II), ale ty jsou vhodné pouze pro čistě energeticky nebo chemicky orientované modely. Programy určené přímo pro tato specifická zařízení s sebou přináší řadu výhod, mimo jiné i uživatelskou přístupnost, avšak široká využitelnost komerčních systémů je spojena s vyššími nároky na vstupní data a mnohdy obtížnou orientaci v těchto systémech. [23]

Z tohoto důvodu byl na pracovišti ÚPEI ve spolupráci s Fakultou informačních technologií VUT v Brně vyvinut specializovaný software W2E (Waste-to-Energy). Waste to Energy je nástroj pro modelování a simulaci technologických procesů. Je tvořen grafickým uživatelským rozhraním a sekvenčně modulárním simulačním jádrem pro výpočet hmotnostních a energetických bilancí technologických linek v oblasti energetického využití odpadů a biomasy. [24]

6 Postup výpočtů

Byly provedeny dvě série výpočtů, které sledovaly vliv různého stupně vysušení kalů před jejich vlastním spalováním na celkový potenciální zisk tepelné, resp. elektrické energie. Bylo uvažováno zpracování kalů, které byly různým způsobem předupraveny. V prvním případě se jednalo o zpracování surového směšného kalu, v druhé sérii výpočtů se jednalo o zpracování kalu, který byl anaerobně stabilizován. Konkrétní vstupní data a zadávané parametry se nacházejí v kapitole 6.2.

6.1 Strategie výpočtů

Ve výpočtech se uvažoval kal s konstantním efektem mechanického odvodnění na obsah 33 % hm. sušiny a 67 % hm. vody. Pro variantu SSK a ASK počítáme sušení kalu na zbytkový obsah vody od 0 % až pro 60 % v materiálu, který byl následně sušen a spalován ve fluidním spalovacím kotli.

U variant, kde dosáhla výhřevnost spalovaného materiálu hodnoty vyšší než 8 MJ/kg, byl proces spalování veden pouze za provozu přídavného hořáku spalujícího ZP za minimálního výkonu (10 mN^3/h). Ve variantách, kdy výhřevnost spalovaného materiálu byla nižší než 8 MJ/kg, bylo spalování vedeno za provozu přídavného hořáku spalujícího ZP s výhřevností 35,8 MJ/kg. Výkon přídavného hořáku byl volen tak, aby celkové uvolněné teplo spalováním kalu a spalováním zemního plynu činilo 8,358 GJ/h z důvodu možného srovnání variant SSK a ASK.

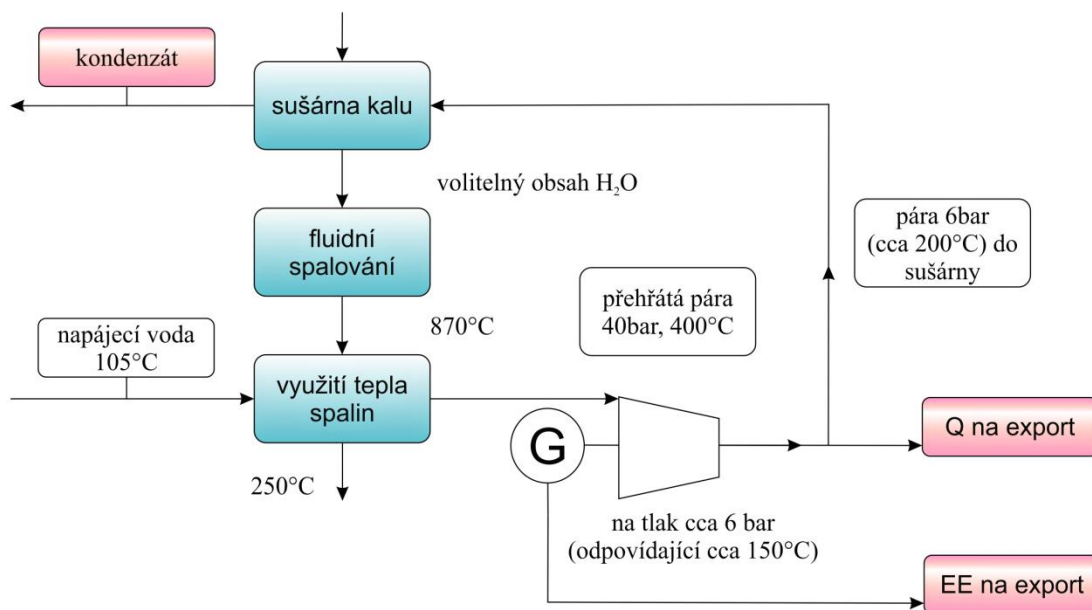
6.2 Zadávaná data a sledované parametry

Po vysušení 33 % kalu v sušárně na volitelný obsah sušiny, postupuje kal do spalovací komory. Výpočty byly vedeny tak, aby směsné spaliny vzniklé spalováním kalu za voleného přebytku vzduchu se spaliny vzniklémi spalováním zemního plynu měly před vstupem do HRSG teplotu 880 °C. Tato teplota byla volena s rezervou 30 °C oproti teplotě 850 °C, kterou jako minimální vyžaduje legislativa (vyhláška 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší). Tyto hodnoty ovlivníme množstvím přebytku vzduchu ve spalovací komoře a před kotlem. Teplota 880 °C není dána legislativou, ale je určena pro přesnější porovnání všech variant.

V teplosměnném systému kotle pro využití tepla spalin (HRSG - Heat recovery steam generator) je volena výroba přehřáté páry na teplotu 400 °C a tlak 40 barů, spaliny jsou poté snižovány na teplotu 250 °C. Napájecí voda o teplotě 105 °C vstupující do HRSG, která ochlazuje spaliny, vystupuje ve formě přehřáté páry o teplotě 400 °C a 40 barů. Ve výpočtech je uvažováno využití vyrobené páry k výrobě elektrické energie v protitlaké turbíně, kde přehřátá pára expanduje na tlak 6 bar, čemuž při zvolené vnitřní termodynamické účinnosti odpovídá teplota zhruba 200 °C.

Velikost uvolněného tepla byla srovnána s potřebou tepla na sušení odvodněného kalu, která by probíhala v sušárně ochlazením a kondenzací páry stejných parametrů. Tato hodnota se stala výchozím parametrem sloužícím pro posouzení maximálně dosažitelného zisku tepelné energie při zpracování kalů po různé jejich předúpravě a s proměnným stupněm vysušení.

Vstupní parametry se pro varianty SSK a ASK nemění, ovšem množství potřebné energie k vysušení kalu se u variant mění z důvodu rozdílného množství sušiny.



Obrázek 11 - Schéma vstupních parametrů

6.2.1 Výpočet tepla pro odpaření vody a k ohřátí kalu - SSK

Tyto výpočty jsou provedeny pro výchozí obsah sušiny 33 % hm. po mechanickém odvodnění.

Charakteristika	Jednotka	Hodnota
Obsah sušiny po odvodnění	% hm.	33
Obsah H_2O kalu po odvodnění	% hm.	67
Teplota vstupního paliva	$^{\circ}C$	20
Teplota výstupního paliva	$^{\circ}C$	99,6
Tlak	bar	1
Měrné teplo sušiny kalu	$kJ/(kg.K)$	0,9
Počáteční relativní koncentrace, X_1	t/t	2,03
Průtok mokrého kalu	kg/h	3,03

Tabulka 13 - Vstupní charakteristiky odvodněného kalu a podmínky sušení [25]

Výpočet výstupní relativní koncentrace

$$X_2 = \frac{w(H_2O)}{w(s)} \quad (6-1)$$

, kde:

- X_2 výstupní relativní koncentrace [t/t],
 $w(H_2O)$ množství zbytkové vody ve vysušeném kalu [%],
 $w(s)$ množství sušiny ve vysušeném kalu [%].

Bilance sušení mokrého kalu

$$w_{(H_2O),2} = X_1 - X_2 \quad (6-2)$$

, kde:

- $w_{(H_2O),2}$ množství odpařené vody v sušárně [%],
 X_1 počáteční relativní koncentrace [t/t],
 X_2 výstupní relativní koncentrace [t/t].

Charakteristika	Varianty vysušení					
Obsah sušiny v odvodněném kalu (%)	90	80	70	60	50	40
Zbytková voda ve vysušeném kalu (%)	10	20	30	40	50	60
Výstupní relativní koncentrace (t/t)	0,11	0,25	0,43	0,66	1,00	1,50
Odpařená voda v sušárně (t/t)	1,919	1,780	1,601	1,363	1,030	0,530

Tabulka 14 – Výpočet množství odpařené vody pro dosažení zvoleného stupně vysušení kalu

Hodnoty potřebné k výpočtu tepla na odpaření vody a ohřev kalu

Tyto hodnoty jsou totožné pro variantu SSK i ASK.

Charakteristika	Označení	Jednotka	Hodnota
Vstupní teplota kalu	t_1	°C	20
Výstupní teplota kalu	t_2	°C	99,6
Měrná entalpie vody ve vstupním kalu	$h_{(H_2O)}$	kJ/kg	83,9
Měrná entalpie odpařené páry	h_1	kJ/kg	2674,9
Měrná entalpie neodpařené vody	h_2	kJ/kg	417,4
Měrné teplo sušiny kalu	c_p	kJ/(kg.K)	0,9

Tabulka 15 – Použité hodnoty pro výpočet tepla na odpaření vody

Výpočet tepla na ohřev sušiny kalu

$$Q_1 = 1000 \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (6-3)$$

, kde:

- Q_1 teplo na ohřev sušiny kalu [kJ/t],
 c_p měrné teplo sušiny kalu [kJ/kg.K],
 t_2 Výstupní teplota [°C],
 t_1 vstupní teplota [°C].

Výpočet tepla na odpaření vody

$$Q_2 = w_{(H_2O)} \cdot 1000 \cdot (h_{(1)} - h_{(H_2O)}) \quad (6-4)$$

, kde:

- Q_2 teplo na odpaření vody [kJ/t],
 $w_{(H_2O),2}$ odpařená voda v sušárně [t/t],
 $h_{(1)}$ měrná entalpie ohřáté vody [kJ/kg],
 $h_{(H_2O)}$ měrná entalpie vody [kJ/kg].

Výpočet tepla na ohřátí neodpařené vody

$$Q_3 = w_{(H_2O)} \cdot 1000 \cdot (h_{(2)} - h_{(H_2O)}) \quad (6-5)$$

, kde:

- Q_3 teplo na ohřátí neodpařené vody [kJ/t],
 $w_{(H_2O)}$ odpařená voda v sušárně [t/t],
 $h_{(2)}$ měrná entalpie neodpařené vody [kJ/kg],
 $h_{(H_2O)}$ měrná entalpie vody [kJ/kg].

Shrnutí výsledků výpočtu tepla potřebného pro sušení kalu je uvedeno v tabulce č. 16.

Charakteristika	Jednotka	Stupeň vysušení kalu (% hm. sušiny/% hm. vody)					
		90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60
Teplo na ohřev sušiny kalu	GJ/t	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072
Teplo na odpaření vody	GJ/t	4,973	4,613	4,150	3,533	2,670	1,374
Teplo na ohřátí neodpařené vody	GJ/t	0,038	0,083	0,143	0,222	0,318	0,500
Celkové teplo	GJ/t	5,081	4,767	4,364	3,827	3,058	1,945

Tabulka 16 – Výsledky výpočtů celkového tepla pro odpaření vody a k ohřátí kalu SSK

6.2.2 Výpočet tepla pro odpaření vody a k ohřátí kalu – ASK

Pro výpočet tepla na odpaření vody a ohřev kalu pro variantu ASK je hodnota sušiny po anaerobní stabilizaci snížena z jedné tuny sušiny na 0,615 tuny.

Charakteristika	Jednotka	Hodnota
Počáteční relativní koncentrace, X_1	t/t	1,25
Průtok mokrého kalu	kg/h	1,864

Tabulka 17 – Počáteční relativní koncentrace pro ASK

Výpočet výstupní relativní koncentrace u různých stupňů relativní koncentrace a bilance sušení se počítá podle stejných vzorců, jako u varianty ASK.

Charakteristika	Varianty vysušení					
Obsah sušiny v odvodněném kalu (%)	90	80	70	60	50	40
Zbytková voda ve vysušeném kalu (%)	10	20	30	40	50	60
Výstupní relativní koncentrace (t/t)	0,068	0,153	0,263	0,409	0,615	0,922
Odpařená voda v sušárně (t/t)	1,182	1,097	0,987	0,841	0,635	0,328

Tabulka 18 - Výpočty koncentrací a bilancí sušení pro varianty sušení ASK

Výsledky výpočtu tepla na odpaření vody a ohřev kalu pro variantu ASK

Charakteristika	Jednotka	Stupeň vysušení kalu (% hm. sušiny/% hm. vody)					
		90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60
Teplo na ohřev sušiny kalu	GJ/t	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072
Teplo na odpaření vody	GJ/t	3,063	2,842	2,557	2,179	1,645	0,850
Teplo na ohřátí neodpařené vody	GJ/t	0,023	0,051	0,087	0,136	0,205	0,307
Celkové teplo	GJ/t	3,158	2,965	2,716	2,387	1,922	1,229

Tabulka 19 - Výsledky celkového tepla pro odpaření vody a k ohřátí kalu ASK

6.2.3 Výpočty výhřevnosti vlhkého kalu pro různé varianty sušení

Bylo dohodnuto, že podmínkou pro samostatné spalování vysušeného kalu bude to, aby spalovaný materiál vykazoval výhřevnost minimálně 8 MJ/kg. Za těchto podmínek bylo uvažováno s tím, že ve spalovací komoře bude v provozu stabilizační hořák pracující při minimálním výkonu 100 kW (odpovídá spotřeba zemního plynu 10 m³/h). Pro alternativy, kdy byl spalován materiál o nižší výhřevnosti, byla spotřeba přídatného paliva (ZP).

$$LHV_{(wet)} = LHV \cdot \frac{X(s)}{100} - r(H_2O) \cdot \frac{1-X(s)}{100} \quad (6-6)$$

, kde:

- LHV_(wet) výhřevnost mokrého kalu [MJ/kg],
 X_(s) hmotnostní koncentrace sušiny ve vysušeném kalu [t/t],
 r_(H₂O) výparné teplo [MJ/kg].

Stupeň vysušení	LHV(wet), SSK	LHV(wet), ASK
90 % sušiny	13,981	9,493
80 % sušiny	12,155	8,166
70 % sušiny	10,328	6,838
60 % sušiny	8,502	5,511
50 % sušiny	6,676	4,183
40 % sušiny	4,850	2,856

Tabulka 20 - Výsledky výhřevností mokrého kalu pro různé stupně vysušení

6.2.4 Výpočty množství přídatného paliva

Pro hodnoty výhřevnosti tuhého paliva nižší než daných 8 MJ/kg (viz. tabulka č. 20), se stanoví přidané množství ZP (viz. tabulka č. 21). K tomuto množství se přičte minimální hodnota přídatného paliva, které je společné i pro hodnoty výhřevnosti mokrého kalu, které splňují podmínky 8 MJ/kg. Tento krok je důležitý pro přesné porovnání výsledků všech variant. Výpočet potřebného paliva je dán vztahem a je počítán pro výhřevnost ZP 35,8 MJ/kg:

$$Q_{ZP} = LHV_{(wet)} \cdot \frac{1000}{LHV_{(ZP)}} + Q_{Vmin} \quad (6-7)$$

, kde:

- Q_{ZP} objemový průtok ZP [m³/h],
 LHV_(wet) výhřevnost mokrého kalu [MJ/kg],
 LHV_(ZP) výhřevnost ZP [MJ/kg],
 Q_{Vmin} minimální objemový průtok ZP [m³/h].

Charakteristika	SSK (mN^3/h)	ASK (mN^3/h)
90 % sušiny	10,0	10,0
80 % sušiny	10,0	10,0
70 % sušiny	10,0	42,4
60 % sušiny	10,0	79,5
50 % sušiny	46,9	116,6
40 % sušiny	97,9	153,7

Tabulka 21 - Množství přidaného paliva

6.3 Hodnoty vložené v programu W2E

Byly voleny hodnoty pro program W2E. Ukázka sestaveného okruhu (konkrétně pro variantu SSK s 60 % obsahem sušiny) v příloze č. 1.

Zadávané hodnoty:

Sušárna:

- vstupní teplota tuhého paliva 20 °C
- výsledná teplota tuhého paliva 99,6 °C
- výsledná vlhkost tuhého paliva (dle stupně vysušení)
- tlak 100 kPa
- množství mokrého kalu 3030 kg/h pro SSK a 1,864 kg/h pro ASK
- výhřevnost sušiny kalu
- složení paliva a hořlaviny

Spalovací komora:

- teplota spalovacího vzduchu 105 °C
- tlak 101 kPa
- přebytek vzduchu spalovací komory pro dodržení teploty za komorou 870 °C
- ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích 1 %
- ztráty tepla spalovací komory sáláním do okolí (1 % z tepla uvolněného spalováním)

Spalování plynů:

- množství ZP potřebné ke spalování
- přebytek vzduchu pro dodržení 880 °C před vstupem do HRSG

HRSG:

- tlak vyrobené přehřáté páry 4 000 kPa
- teplota vyrobené přehřáté páry 400 °C
- koeficient teplotních ztrát (1 % z tepla převedeného v HRSG)
- odluh 1 %

Všechny tyto hodnoty byly vloženy do programu a následně porovnány. Výpočet programem W2E byl opakovaně prováděn tak, aby postupnou volbou zadávaného přebytku spalovacího vzduchu pro spalování odpadu zadaného složení byla dosažena teplota spalin před vstupem do HRSG ve výši 880°C.

7 Výsledky výpočtů a jejich diskuse

Po zadání všech dat do programu W2E (schéma viz. příloha č. 1) se upravily přebytky vzduchu za spalovací komorou na požadované teploty 870 °C a 880 °C před HRSG.

Hodnoty získané z programu W2E pro variantu SSK a ASK

V tabulce č. 22 pro SSK a v tabulce č. 23 pro ASK jsou vypsány vybrané hodnoty z programu W2E pro volené stupně vysušení. Přebytek spalovacího vzduchu za spalovací komorou byl volen tak, aby byla teplota za spalovací komorou 870 °C. Další vybranou hodnotou je množství vlhkého kalu vystupujícího za sušárnou a množství přidaného paliva zadáno na základě výpočtů z tabulky č. 21. Vztah (7-1) je počítán rozdílem měrné entalpie páry po expanzi ze 40 barů na 6 barů (tomuto tlaku odpovídá teplota zhruba 200 °C) a měrné entalpie zkondenzované vody na 6 barů při teplotě bodu varu a vynásobeným množstvím páry zpátky do sušárny.

Výpočet množství tepla vzniklého za turbínou

$$Q_4 = \frac{(h_3 - h_4) \cdot Q_m}{1000000} \quad (7-1)$$

, kde:

Q_4	vzniklé množství tepla získané ochlazením a kondenzací páry za turbínou [GJ/kg],
h_3	měrná entalpie expandované páry za turbínou [kJ/kg]
h_4	měrná entalpie zkondenzované vody na 6 barů [kJ/kg],
Q_m	množství páry do sušárny [kg/h].

V tabulce č. 24 pro SSK a v tabulce č. 25 pro variantu ASK je porovnáno množství tepla, které je potřebné k vysušení kalu pro různě stupně vysušení, s teplem vzniklým ochlazením a kondenzací veškeré páry za protitlakou turbínou.

Charakteristika	Jednotky	100 % sušiny	90 % sušiny	80 % sušiny	70 % sušiny	60 % sušiny	50 % sušiny	40 % sušiny
Přebytek spalovacího vzduchu	-	3,15	3,04	2,9	2,74	2,51	2,2	1,74
Spalované množství vlhkého kalu	kg/h	1000	1111	1250	1428	1666	1999	2499
Množství přídavného paliva	m _N ³ /h	10	10	10	10	10	47	98
Měrná entalpie páry za turbínou, h ₃	kJ/kg	2874,6						
Měrná entalpie páry po expanzi, h ₄	kJ/kg	670,47						
Rozdíl entalpií páry	kJ/kg	2204,13						
Množství páry do sušárny	kg/h	4601,9	4502,6	4398	4259,5	4074,8	4207,6	4356

Tabulka 22 – Vybrané hodnoty získané z programu W2E pro variantu SSK

Charakteristika	Jednotky	100 % sušiny	90 % sušiny	80 % sušiny	70 % sušiny	60 % sušiny	50 % sušiny	40 % sušiny
Přebytek spalovacího vzduchu	-	3,03	2,89	2,69	2,46	2,16	1,73	1,09
Spalované množství vlhkého kalu	kg/h	614,8	683,1	768,5	878,3	1024,6	1229,6	1537,0
Množství přídavného paliva	m _N ³ /h	10	10	10	42,4	79,5	116,6	153,7
Měrná entalpie páry za turbínou, h ₃	kJ/kg	2874,6						
Měrná entalpie páry po expanzi, h ₄	kJ/kg	670,47						
Rozdíl entalpií páry	kJ/kg	2204,13						
Množství páry do sušárny	kg/h	2058,6	1997,9	1933	2177	2360,6	2680,3	2830,7

Tabulka 23 - Vybrané hodnoty získané z programu W2E pro variantu ASK

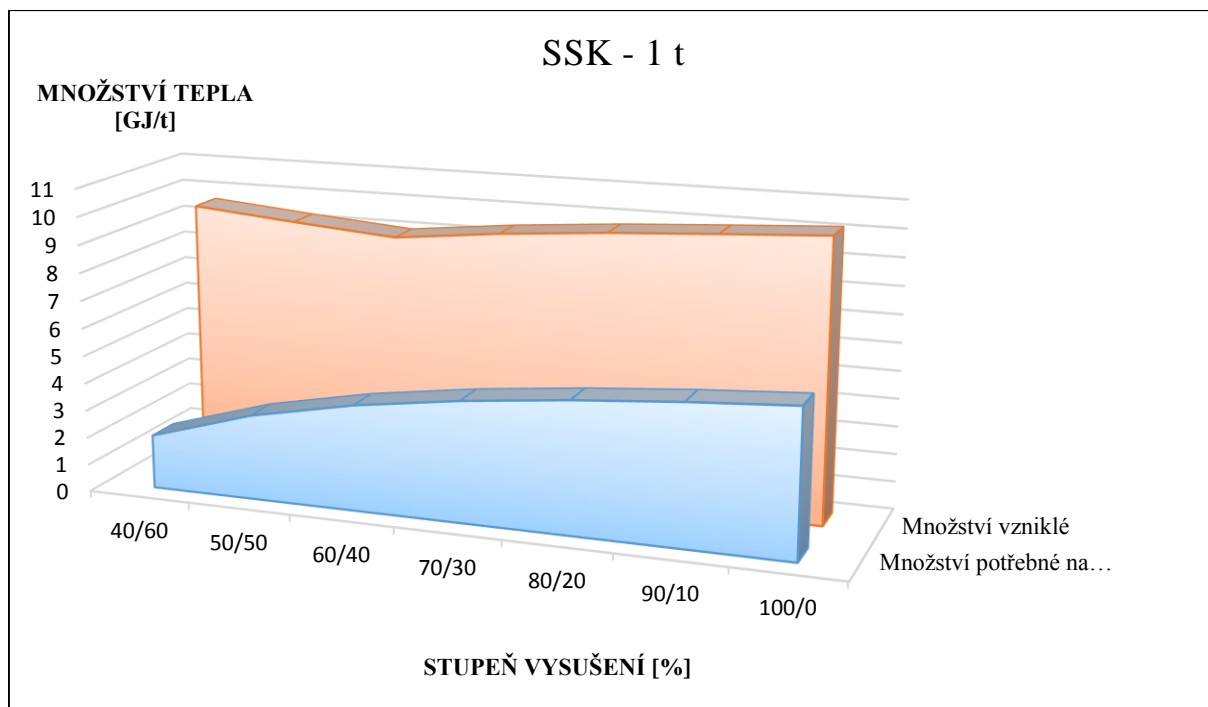
Charakteristika	Jednotky	100 % sušiny	90 % sušiny	80 % sušiny	70 % sušiny	60 % sušiny	50 % sušiny	40 % sušiny
Množství tepla potřebné k vysušení kalu	GJ/t	5,33	5,08	4,76	4,36	3,82	3,07	1,95
Vzniklé množství tepla za turbínou	GJ/t	10,14	9,92	9,69	9,38	8,98	9,27	9,60
Přebytek tepla	GJ/t	4,81	4,84	4,92	5,02	5,15	6,20	7,65

Tabulka 24 – Porovnání potřebného tepla k vysušení kalu s vzniklým množstvím za turbínou pro variantu SSK

Charakteristika	Jednotky	100 % sušiny	90 % sušiny	80 % sušiny	70 % sušiny	60 % sušiny	50 % sušiny	40 % sušiny
Množství tepla potřebné k vysušení kalu	GJ/t	3,28	3,16	2,96	2,71	2,38	1,92	1,23
Vzniklé množství tepla za turbínou	GJ/t	4,53	4,40	4,26	4,80	5,20	5,90	6,24
Přebytek tepla	GJ/t	1,25	1,24	1,29	2,08	2,81	3,98	5,01

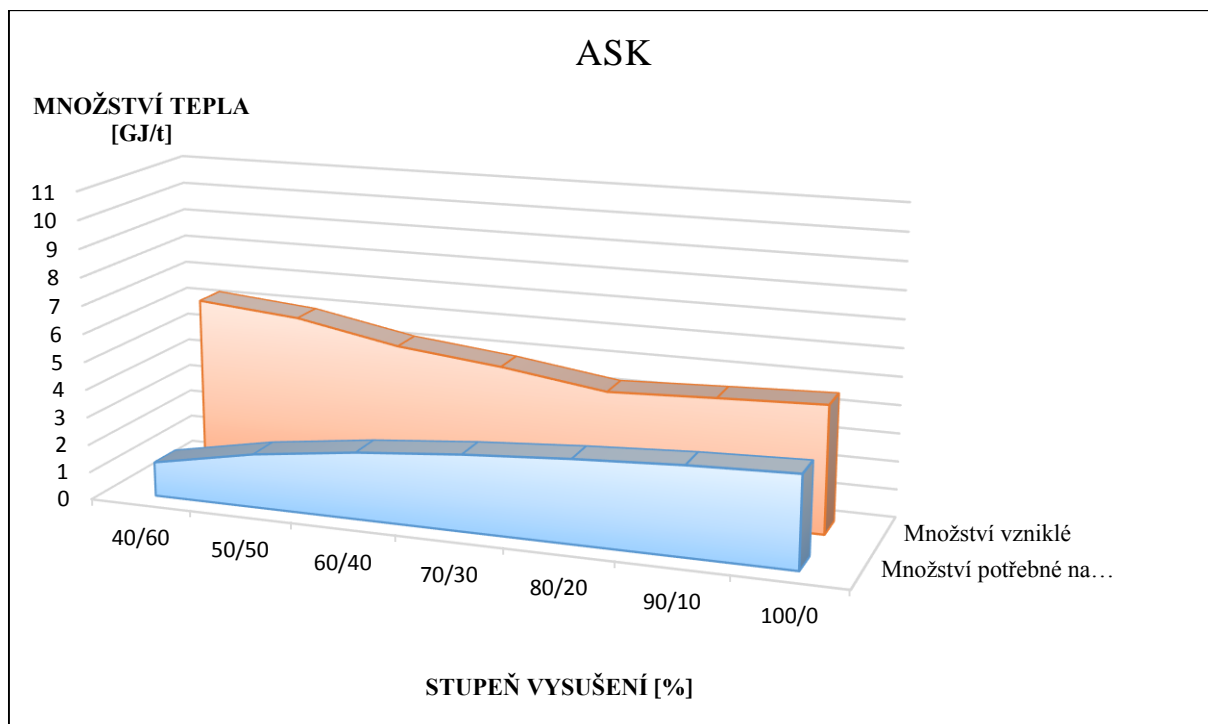
Tabulka 25 - Porovnání potřebného tepla k vysušení kalu s vzniklým množstvím za turbínou pro variantu ASK

V grafu č. 1 je znázorněno porovnání tepla, které vzniká ochlazením a kondenzací veškeré páry za turbínou (červená plocha) s teplem potřebným k vysušení kalu na různé stupně vysušení (modrá plocha). Z grafu je patrné, že u této varianty vzniklé teplo výrazně převyšuje teplo potřebné k vysušení, i když výsledek stále ovlivňuje přídavek zemního plynu. Tuto přidanou energii bude nutné ve výsledku odečíst, jelikož se jedná o energii, která je dodaná. Od vysušení na 100 % obsah sušiny na obsah sušiny 60 % má graf klesající tendenci. Následné stoupání u hodnot od 50 % obsahu sušiny je způsobeno přidáním paliva s výrazně vyšší výhřevností oproti výhřevnosti vlhkého kalu.



Graf č. 1 - Porovnání vzniklého tepla po ochlazení a kondenzaci veškeré páry za turbínou s teplem potřebným k vysušení kalu pro variantu SSK

U varianty anaerobně stabilizovaného kalu (graf č. 2) je rozdíl tepla vzniklého za turbínou a tepla potřebného k vysušení kalu výrazně nižší než u varianty surového směsného kalu. To je způsobeno tím, že po anaerobní stabilizaci se výrazně sníží kalorický obsah. Z tohoto důvodu je u této varianty přídavek zemního plynu zvýšen již při vysušení kalu na obsah sušiny nižší než 80 % sušiny. Také u této varianty bude nutné energii přidanou přidavným palivem odečíst pro získání pouze vyprodukované tepelné energie.

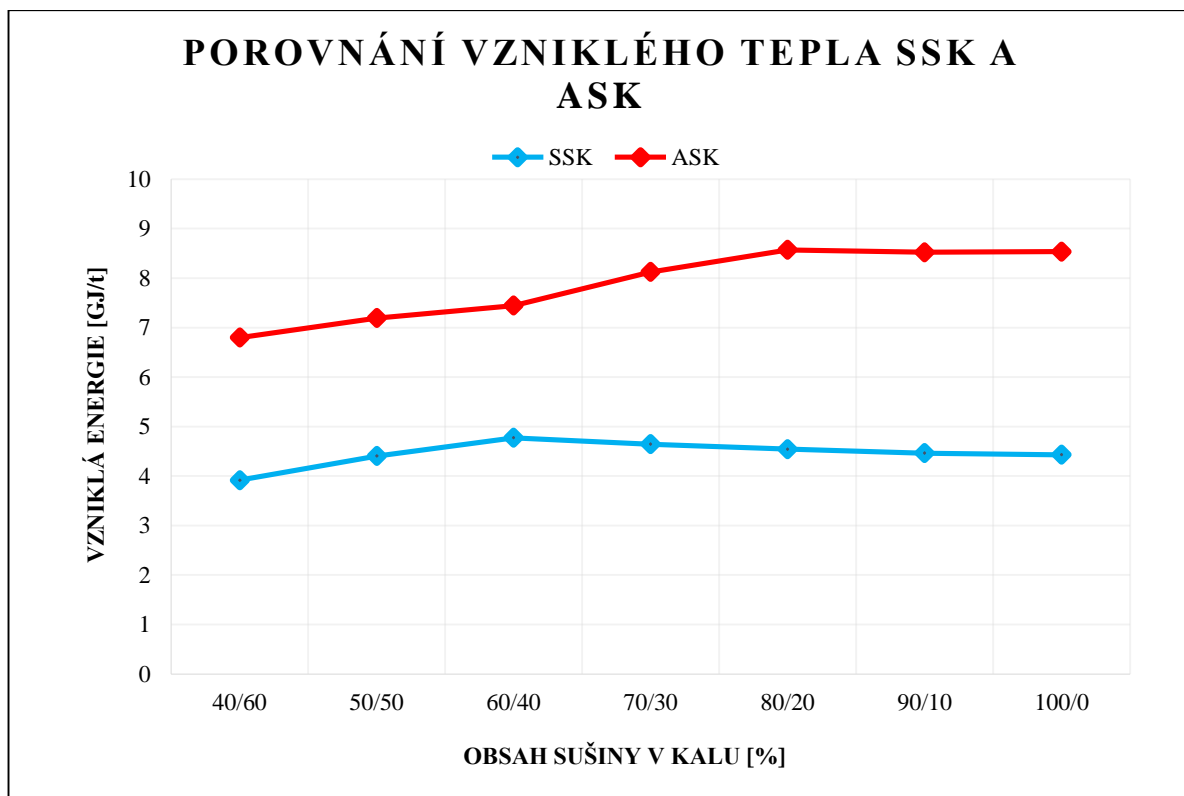


Graf č. 2 - Porovnání vzniklého tepla po ochlazení a kondenzaci veškeré páry za turbínou s teplem potřebným k vysušení kalu pro variantu SSK

V grafu č. 3 je znázorněno pouze vyprodukované teplo. Po odečtení energie z přídatného paliva a přičtení energie (tepelné a elektrické) získané z kogenerační jednotky je patrné, že tepelná energie získaná z anaerobně stabilizovaného kalu je výrazně vyšší než množství směsného surového kalu.

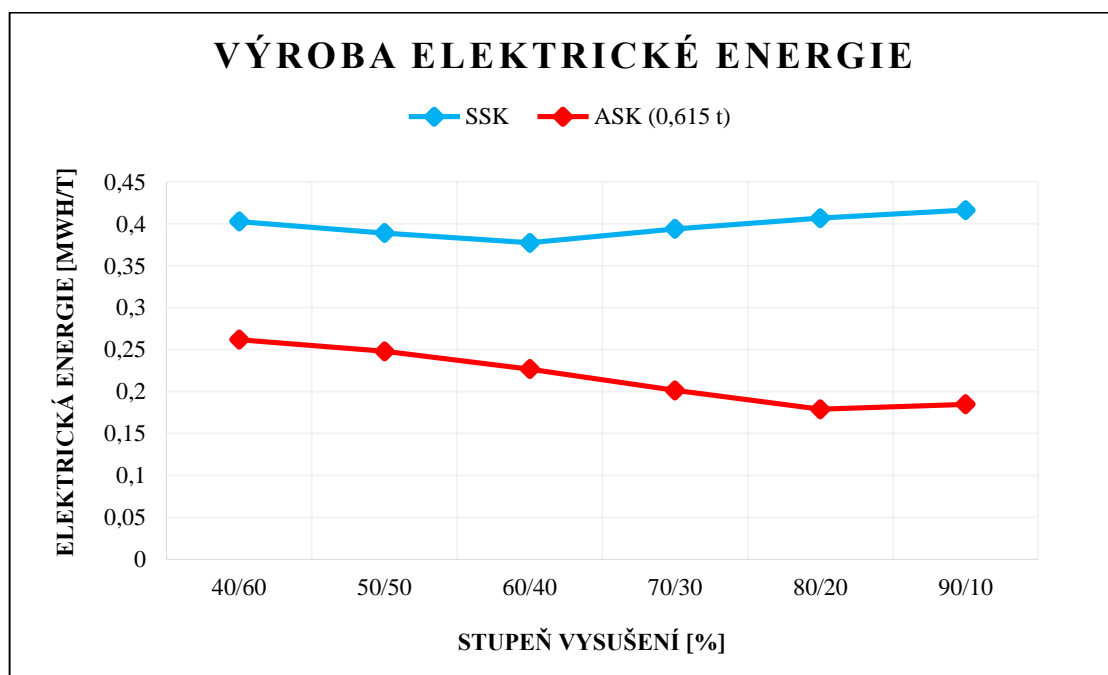
Z grafu vyplývá, že je spalování kalu s předchozí anaerobní úpravou mnohem výhodnější než spalování směsného surového kalu, ovšem je zde mnoho faktorů, které je důležité neopomenout. Ve výpočtech není zahrnuta spotřeba energie potřebné pro provoz fermentorů. Anaerobie je finančně i energeticky náročnější. Vyhřívací nádrže se musí temperovat na teplotu 50 – 70 °C. Při obsahu zhruba 6 % hm. tuhých látek v zahuštěném kalu, který je veden do anaerobních nádrží, připadá asi 1 tuna směsného surového kalu asi 17 m³ zahuštěného kalu. Pokud se toto množství ohřeje z cca 20 °C na 50 °C spotřebuje se nízkopotenciální teplo vzniklé v kogenerační jednotce (viz. tabulka č. 6), jehož hodnota odpovídá 2,45 GJ/tdrySSK z celkového vyrobeného tepla, které činilo 4,55 GJ/tdrySSK.

Další odvedené teplo spotřebované pro anaerobní stabilizaci, která trvá 21 dní, je v tepelných ztrátách ve fermentorech. V praxi se proto veškerý vzniklý bioplyn nevede jen na kogeneraci, jak je uvažováno v této práci, ale část bioplynu se využívá k pokrytí těchto ztrát spalováním přímo v kotlích. Tato energie je také využívána k míchání anaerobních nádrží a celkový energetický chod ČOV.



Graf č. 3 – Množství tepla po odečtení spotřebovaného tepla k vysušení kalu a energie získané z přidaného paliva

Mimo vznik tepelné energie ze spalování směsného surového kalu a anaerobně stabilizovaného kalu vzniká i energie elektrická (viz. graf č. 4). Tato energie je pouze energií vzniklou ze spalování SSK a ASK.



Graf č. 4 – Vzniklá elektrická energie ze spalování kalu SSK a ASK

8 Závěr

Zadáním diplomové práce bylo určit podmínky, za kterých může být spalování kalů procesem energeticky soběstačným, případně procesem energií produkujícím, a zároveň posoudit alternativy termického spalování pro různé stupně vysušení. Pro porovnání se volila varianta zpracování surového směsného kalu s variantou, kdy byl kal předupraven pomocí anaerobní stabilizace. Tyto dvě série výpočtů sledovaly vliv vysušení kalu od 0 % až po 60 % zbytkového obsahu vody na celkový potencionální zisk tepelné a elektrické energie.

V případě výpočtů SSK byly výsledky vztahovány na hodinové zpracování 1 tuny sušiny suchého surového směsného kalu, v případě kalu předupraveného anaerobní stabilizací byla tato hodnota snížena na 0,615 tuny sušiny anaerobně stabilizovaného kalu z důvodu snížení organického podílu kalu v důsledku předchozího vzniku bioplynu.

Pro výpočty byl použit program W2E (Waste to Energy). Byla sestavena bilancová sestava s požadovanými parametry. Za spalovací komorou byl volen přebytek vzduchu tak, aby teplota před HRSG splňovala volenou teplotu 880 °C. Pro stupně vysušení, které měly výhřevnost nižší než 8 MJ/kg, byl přidán zemní plyn o výhřevnosti 35,8 MJ/kg a u variant, které dosáhly hodnoty vyšší než 8 MJ/kg bylo přidáno minimální množství ZP. Množství přidaného paliva bylo voleno tak, aby celkové uvolněné teplo spalováním kalu a spalováním zemního plynu činilo 8,358 GJ/h z důvodu možného srovnání variant SSK a ASK. U HRSG byla volena teplota napájecí vody 105 °C a při jejím využití na ochlazení spalin na teplotu 250 °C vystupovala ve formě přehřáté páry o teplotě 400 °C a tlaku 40 barů. Po generování el. energie v protitlaké turbíně expandovala pára na 6 barů, kdy se teplota páry pohybovala zhruba okolo 200 °C.

Tepelná energie vzniklá za protitlakou turbínou byla výchozím parametrem pro srovnání s tepelnou energií potřebnou pro vysušení kalu na potřebné množství sušiny. Tento rozdíl tepelné energie získaného z ochlazení a kondenzace páry za turbínou a tepla potřebného k vysušení kalu musel být dále snížen o energii dodanou formou zemního plynu.

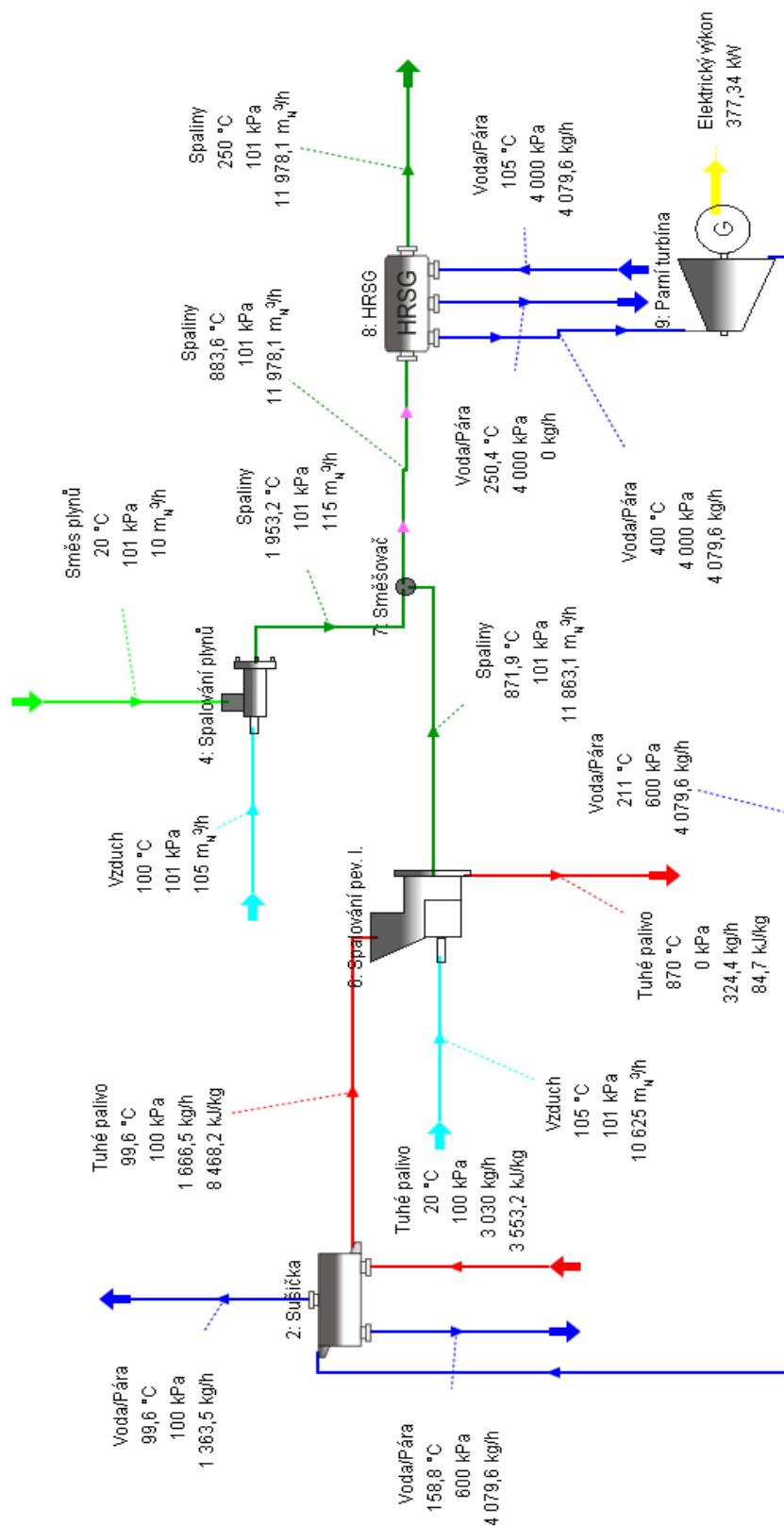
V tuto chvíli byla k variantě s anaerobní předúpravou přičtena tepelná energie získaná z kogenerační jednotky. Nyní se obě varianty získané tepelné energie porovnaly. Varianta ASK byla ve vzniku výsledné energie výrazně vyšší. Je nutné poznamenat, že se diplomová práce nezabývá ekonomickou stránkou věci a od tepelné a elektrické energie odčítáme energii využitou na provoz a tepelné ztráty fermentorů, kam spadá temperace vyhnívacích nádrží a jejich míchání.

9 Seznam použité literatury

- [1] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ.. *Kaly z čistíren odpadních vod* [online]. 2012 [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: http://www.mzp.cz/cz/kaly_cistiren_odpadnich_vod
- [2] DOHÁNYOS, Michal: Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz* [online]. 2006-05-09 [cit. 2014-04-01]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>. ISSN: 1801-2655.
- [3] PAZDERA, Oldřich. Rozšíření a intenzifikace čistíren odpadních vod z hlediska EIA. *Schéma biologické části ČOV Jihlava - po intenzifikaci* [online]. 1999 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/D66DBC7CBF544E3AC1256FC8004A3515/\\$file/str2_2.gif](http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/D66DBC7CBF544E3AC1256FC8004A3515/$file/str2_2.gif)
- [4] ŽEMLIČKA Martin. Název: *Mechanické čištění odpadních vod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 25 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
- [5] Zpracování kalů: Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů. *Charakteristika čistírenských kalů* [online]. 2009 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/charakter.html>
- [6] BORÁŇ, Jaroslav. *Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím*. Brno, 2008. Disertační práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [7] LYČKOVÁ, B., FEČKO, P., KUČEROVÁ R.: *Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů* [online]. Vysoká škola Baňská – Technická univerzita Ostrava. [citováno 20. 1. 2013]. Dostupné z WWW:<<http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/index.html>>
- [8] JAŇUREK, Pavel. Krnovská čistírna odpadních vod zahajuje zkušební provoz. *Novinky.cz* [online]. 2011 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.novinky.cz/vase-zpravy/moravskoslezsky-kraj/bruntal/1260-5520-krnovska-cistirna-odpadnich-vod-zahajuje-po-rekonstrukci-zkusebni-provoz.html>
- [9] HOUDKOVÁ, Lucie, Jaroslav BORÁŇ, Vladimír UCEKAJ a Petr STEHLÍL. Analýza využití energie při zpracování kalů z ČOV. 2005.
- [10] FS Jíčín. In: *Anaerobní fermentace - způsob zpracování bioodpadů* [online]. 2009 [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: http://www.fsjicin.cz/anaerobni-fermentace/?utm_source=copy&utm_medium=paste&utm_campaign=copypaste&utm_content=http%3A%2F%2Fwww.fsjicin.cz%2Fanaerobni-fermentace%2F
- [11] *Stavba bioplynové stanice* [online]. 2008 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.farmastonava.cz/bioplynova-stanice/detail-fotografie/2008-stavba-bioplynove-stanice/foto_494.html
- [12] FORTEX. *Bioplynové stanice „suchá“ anaerobní fermentace* [online]. 2006 [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: <http://www.fortexbioplyn.cz/cz/sucha-fermentace/>

- [13] LAVICKÝ, J. *Výtěžnost bioplynu z různých druhů substrátů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 31s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Beňo.
- [14] HEJÁTKOVÁ, K. *Řešení bioodpadů regionu*, Zemědělská a ekologická regionální agentura, o.s., Náměšť nad Oslavou, 2008, str. 60, ISBN 80-903548-8-2.
- [15] Zpracování kalů: Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů. *Technologické postupy pro zpracování odpadních kalů* [online]. 2009 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/postupy.html>
- [16] ČEZ. *Jak funguje výroba energie z biomasy* [online]. 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa/flash-model-jak-funguje-vyroba-energie-z-biomasy.html>
- [17] BALÁŽ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. *Kotle: 2. část* [online]. 2012 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [18] *Mobil MGW 700 Bioplyn: Typový list kogenerační jednotky* [online]. 2011 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.motorgas.cz/gallery/0/96-typlist_mgw700_mobil_bio_cz.pdf
- [19] HOUDKOVÁ, Lucie, Jaroslav BORÁŇ, Ladislav BÉBAR a Luděk POSPĚCH. *Odpadové fórum 2009 - sborník přednášek: Možnosti využití kalů z ÚČOV Praha*. Praha, 2005. ISBN 978-80-02-02108-7.
- [20] Kalorimetrie. In: *Kalorimetrie: Stanovení spalného tepla a výhřevnosti tuhých paliv* [online]. Praha, 2008 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.mssch.cz/sites/default/files/_uzivatele/valentova/Kalorimetri09.pdf
- [21] RÉDR, Miroslav. *Základy tepelné techniky*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1991, 677 s. ISBN 80-030-0366-0.
- [22] Channiwala, S.A., HHV Formulae, PhD thesis, *On biomass gassification process and technology development*, The Indian Institute of Technology, Bombay, 1992; <http://www.woodgas.com/proximat.htm>.
- [23] Kropáč, J. *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh systému čištění spalin z procesu termického zpracování odpadů*. Brno, 2012, 158s. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [24] BOBÁK, Petr. Waste to Energy Software. *ÚPEI VUT* [online]. Brno, 2009 - 2014 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.upei.fme.vutbr.cz/w2e/>
- [25] ELSÄBER, T. *PERSPECTIVE METHODS OF SEWAGE SLUDGE UTILISATION FOR ENERGY PRODUCTION*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 124 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc..

10 Přílohy



Příloha č. 1 - Schéma v programu W2E